

A experiência CMS como funciona o que procura e alguns marcos importantes



P. Ferreira da Silva (CERN)

15ª Escola de Professores CERN em Língua Portuguesa

Setembro de 2023

Esta apresentação em perspectiva

2

- Motivação
- Construção e operação da experiência CMS
- As primeiras descobertas
- GPS para a física do LHC na era (pós-)Higgs
- CMS: uma experiência em mutação
- Sumário

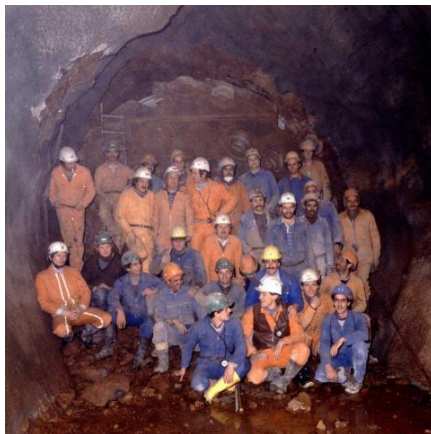
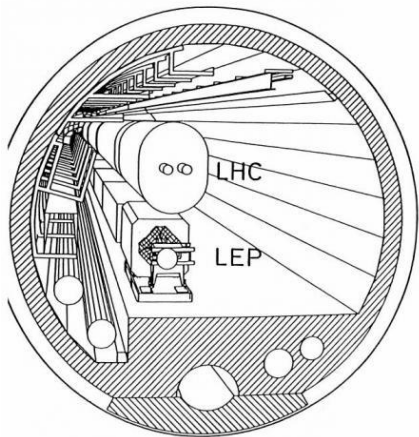
Motivação

Como surgiu e foi o CMS pensada?

Como surgiram o LHC e as suas experiências 4

Lausanne (Suíça), 1984

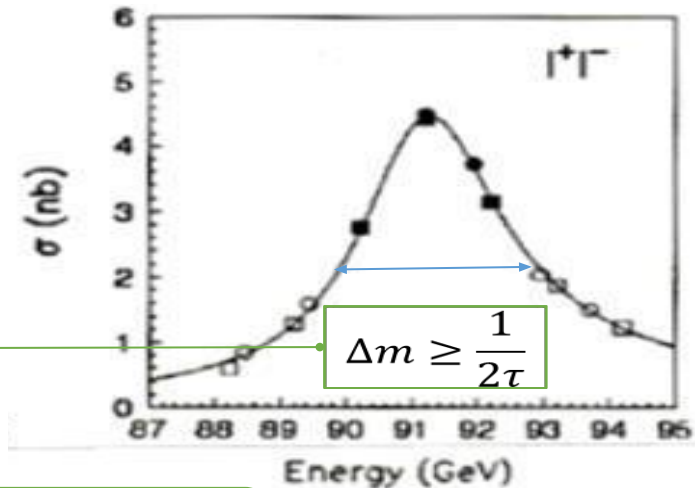
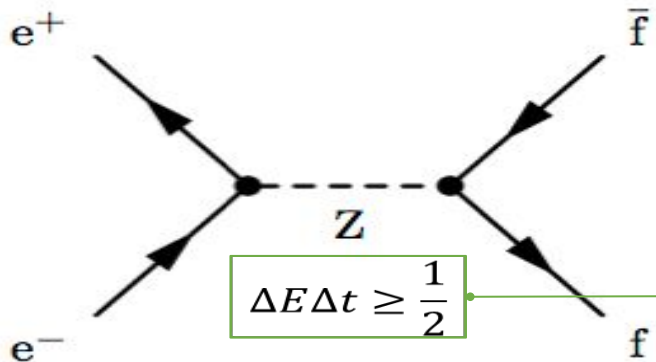
- 1 ano após a **descoberta dos bosões fracos W e Z** é proposto o LHC
- LEP (colisionador e^+e^-) dimensionado de modo a maximizar as energias do LHC
- Fevereiro 1988: termina a escavação do túnel de 27 km (± 1 cm)
- Julho 1989: primeiros feixes injectados no LEP



Questão central: como é que o **W** e o **Z** adquirem massa?

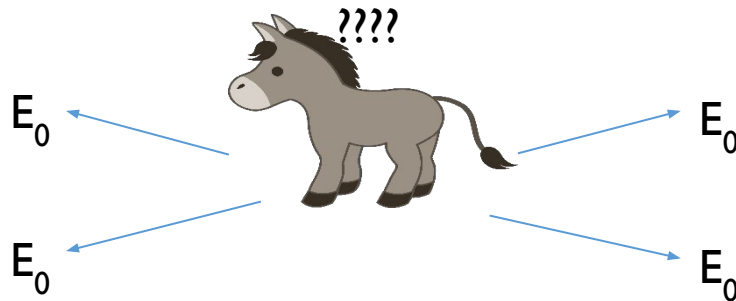
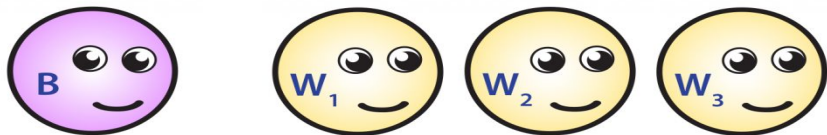
No modelo padrão há um intermediário para todas as interações

- troca de um quanta entre partículas
- sujeita a regras de conservação (energia-momento, carga, etc.)
- transformação padrão (gauge) num grupo de simetria abstracto



• Mas... em geometria não há conceito de massa
 \Rightarrow existe um mecanismo que quebra a simetria original

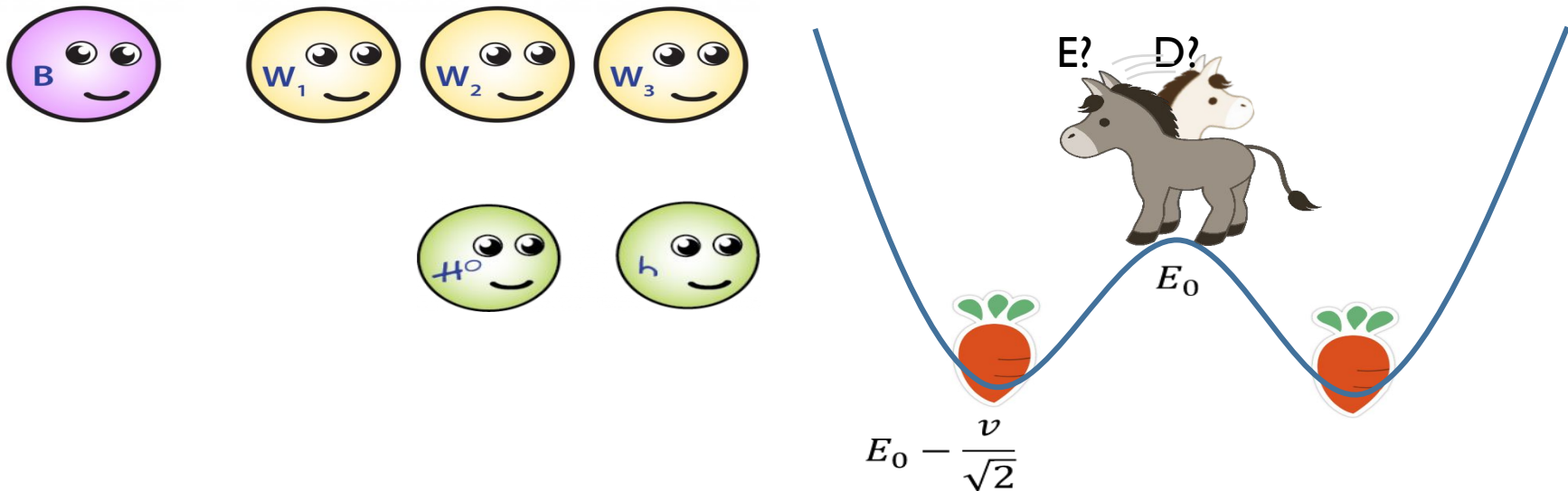
O mecanismo de Higgs



Idealmente (= a uma escala de energia elevada \gg TeV)

- há **1+3** geradores de interações electrofracas
- mas, num estado fundamental simétrico, nenhum tem massa associada

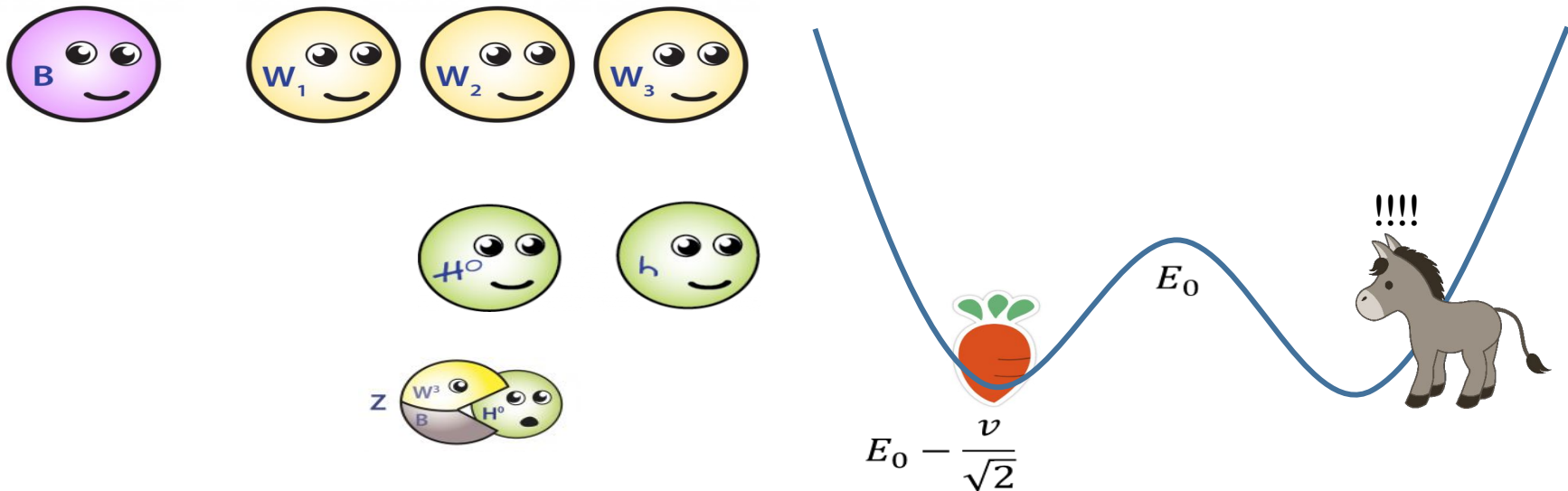
O mecanismo de Higgs



Um dilema surge se o estado fundamental (vácuo) não é simétrico

- gerado pela interacção com um novo campo

O mecanismo de Higgs

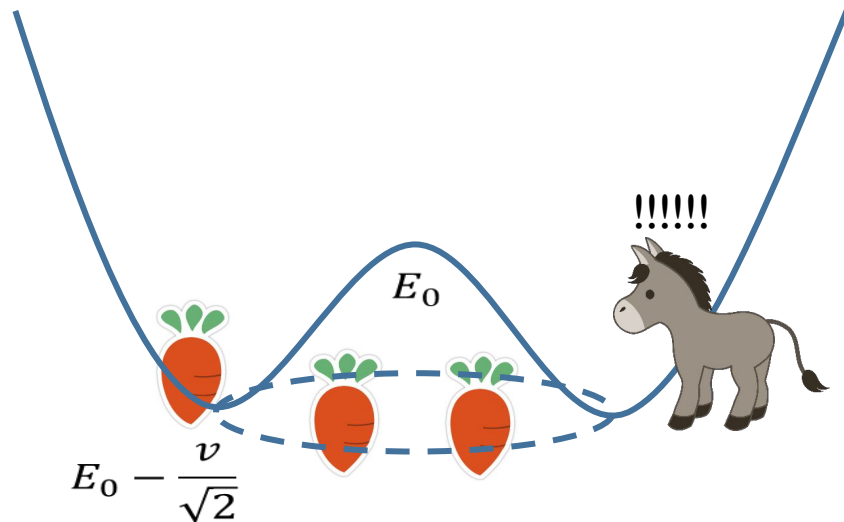
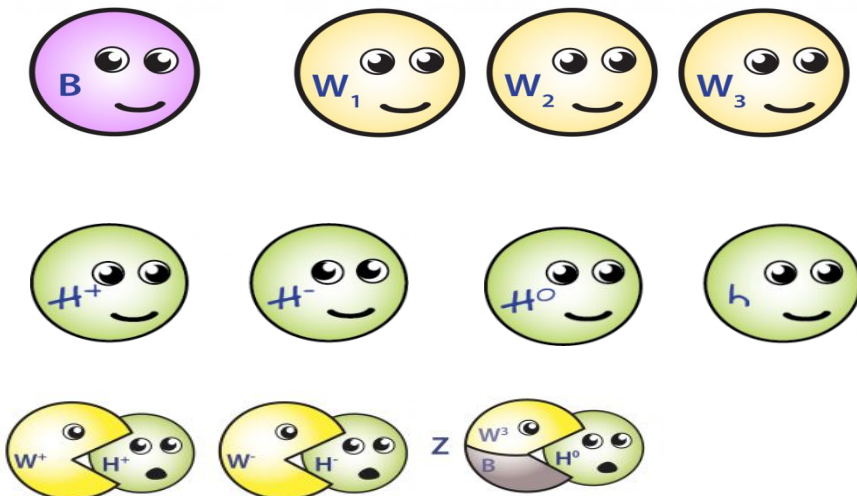


Um dilema surge se o estado fundamental (vácuo) não é simétrico

- gerado pela interacção com um novo campo: o campo de Higgs

1964: Englert-Brout, Higgs, Guralnik-Hagen-Kibble

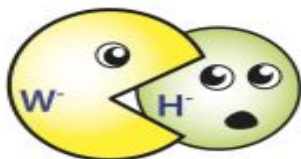
O mecanismo de Higgs



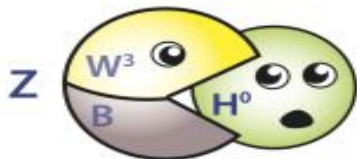
Dilema se o estado fundamental (vácuo) não é simétrico

- gerado pela interacção com um campo extra : o campo de Higgs
- com direcções privilegiadas = estados degenerados de energia

O mecanismo de Higgs



$$M_W = \frac{vg}{2} = 80.4 \text{ GeV}$$

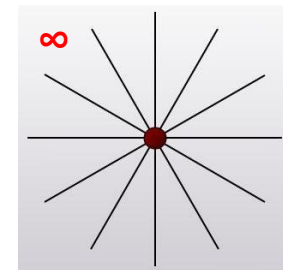
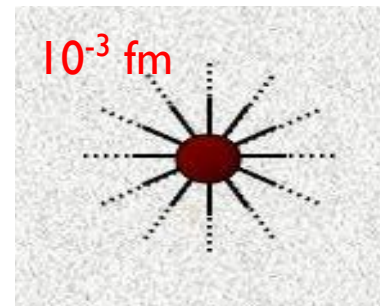


$$M_Z = \frac{v\sqrt{g^2+g'^2}}{2} = 91.2 \text{ GeV}$$



$$M_\gamma = 0$$

$$\Delta p \Delta x \geq \frac{1}{2} \Leftrightarrow \Delta x \sim \frac{1}{2M}$$



Interação com o campo de Higgs

- origina a massa do W e do Z
- confina o alcance das interações fracas a distâncias nucleares

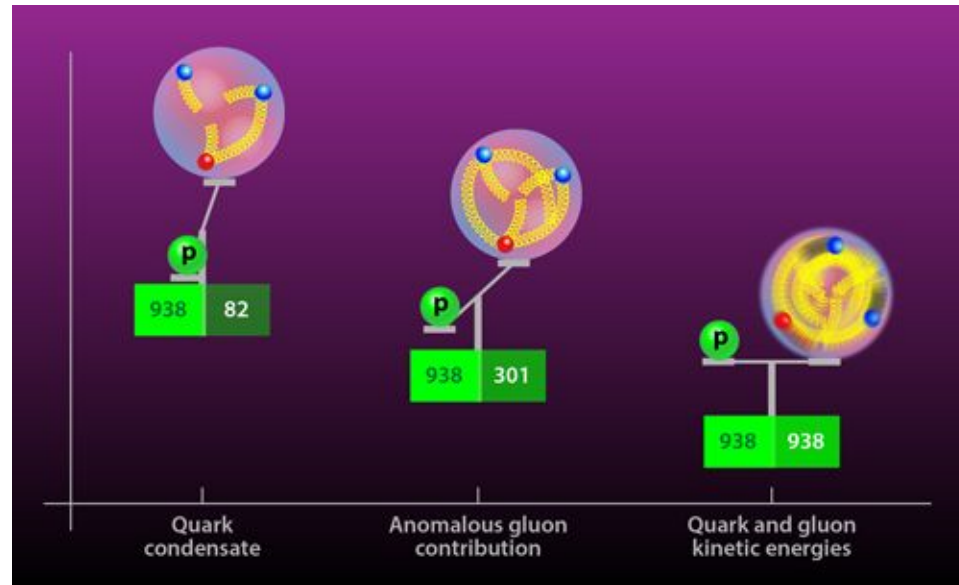
...e então?

Quando o Rádio (Ra) foi descoberto ninguém saberia dizer que seria útil nos hospitais. Foi **pura ciência**. Ser útil hoje em dia é uma demonstração de como **o trabalho científico não deve ser meramente encarado do ponto de vista utilitário**. Deve ser feito por si mesmo, pela beleza da ciência e **haverá sempre uma probabilidade de que uma descoberta científica se torne, tal como o Rádio, útil à humanidade**.

trad. de uma aula de M. Curie no [Colégio Vassar \(NY\), 1921](#)

...e então?

A maior parte da massa da matéria deve-se às interacções fortes que mantêm o núcleo coeso... mesmo que seja este o mecanismo não passa de um detalhe!!!



Uma descoberta fundamental a fazer

Sem o Higgs...

...difícil conceber átomos

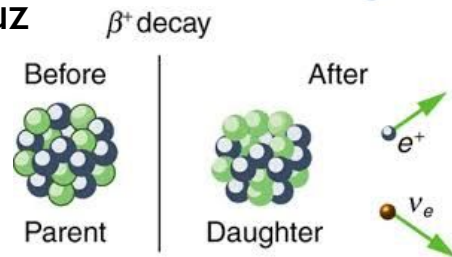
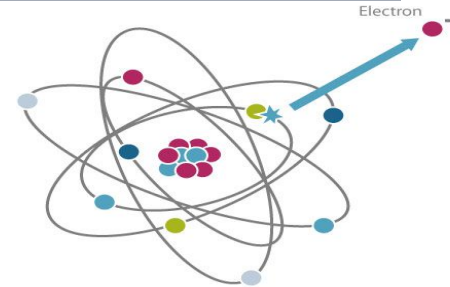
os electrões, sem massa, escapam à velocidade da luz

...mais difícil ainda formar núcleos estáveis

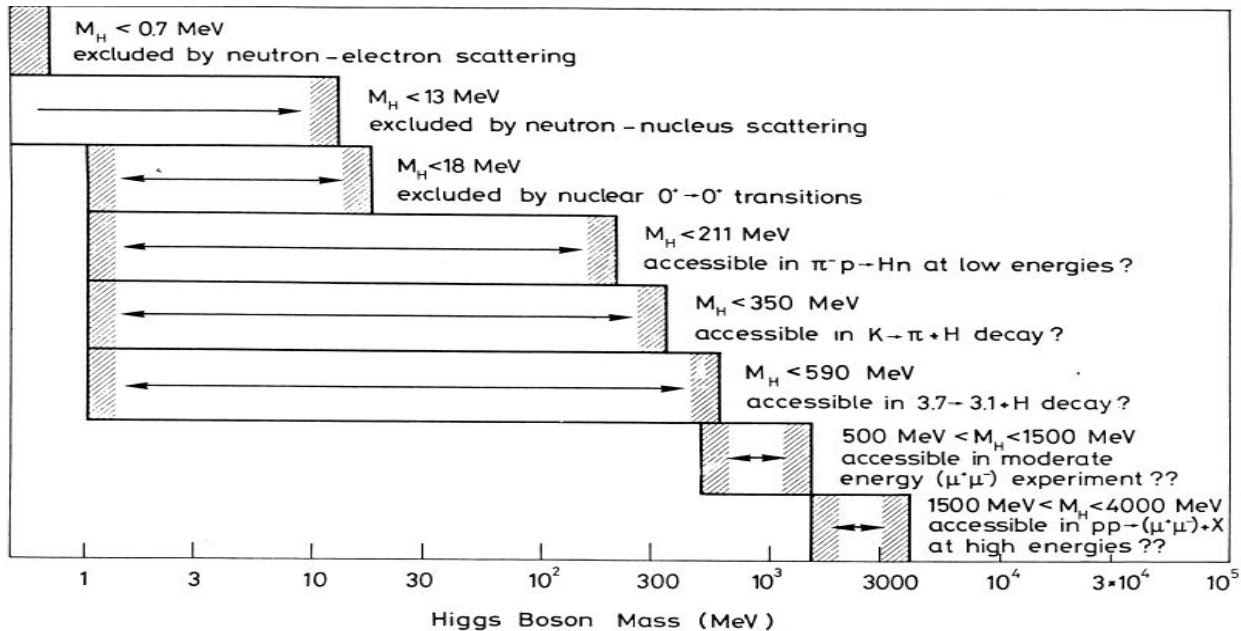
as interacções fracas não teriam nada de fraco

...tudo seria radioactivo

⇒ impossível estarmos aqui, agora



Mas... onde procurar o Higgs?

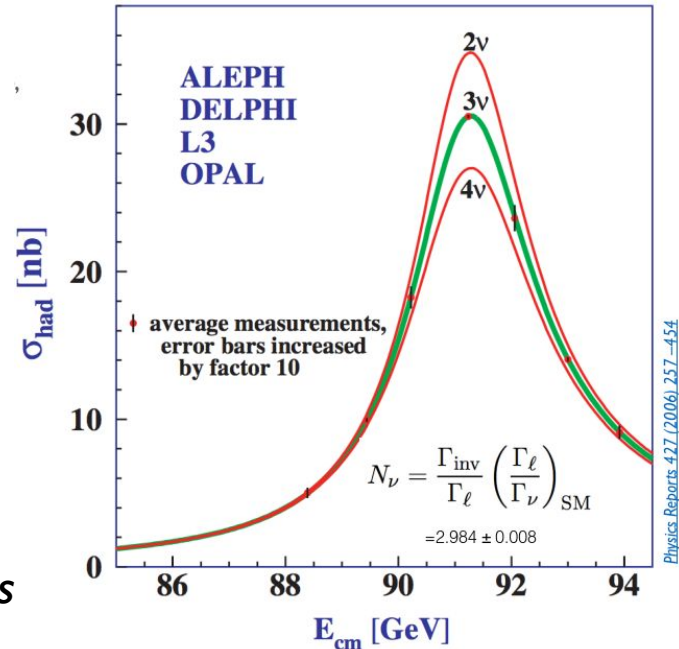


Pedimos desculpa aos experimentalistas pois não temos nenhuma ideia de qual é a massa do bóson de Higgs (...) nem sabermos prever os seus acomplamentos. Desencorajamos assim a sua pesquisa em grandes experiências...

Panorama da física na alvorada do LHC I 15

Terminados os programas de física do LEP (e SLC)

- medidas de precisão compatíveis com o modelo padrão (SM)



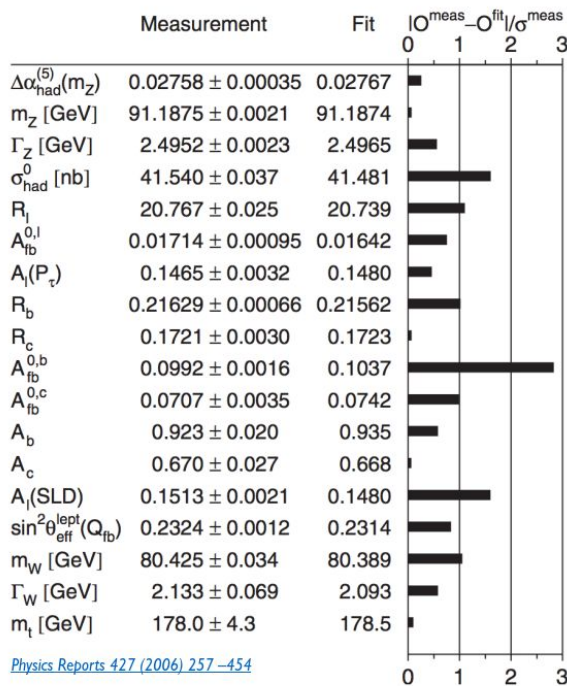
*largura de decaimento do Z
implica 3 famílias activas de neutrinos*



Panorama da física na alvorada do LHC II 16

Terminados os programas de física do LEP (e SLC)

- medidas de precisão compatíveis com o modelo padrão (SM)



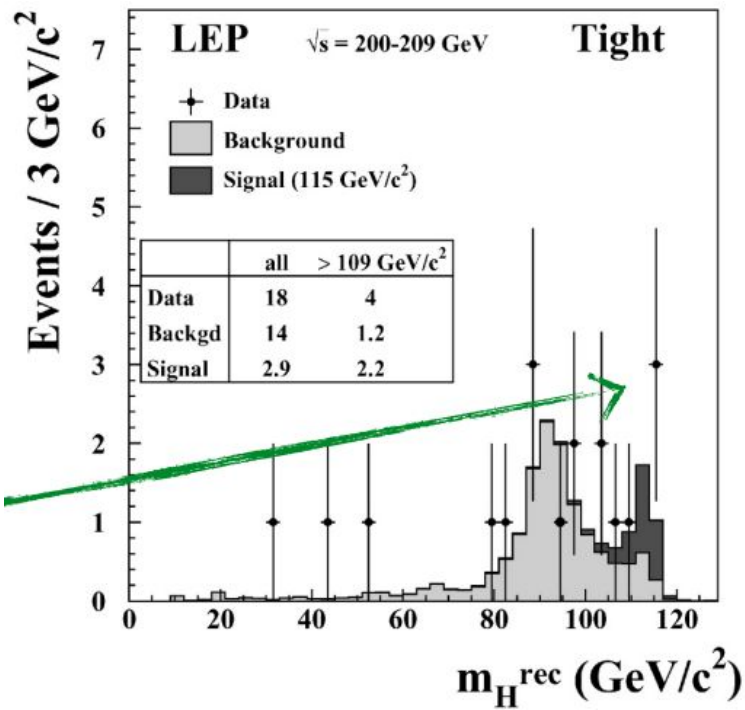
(quase) nenhum desvio significativo entre dados e previsões

Panorama da física na alvorada do LHC III

Terminados os programas de física do LEP (e SLC)

- medidas de precisão compatíveis com o modelo padrão (SM)

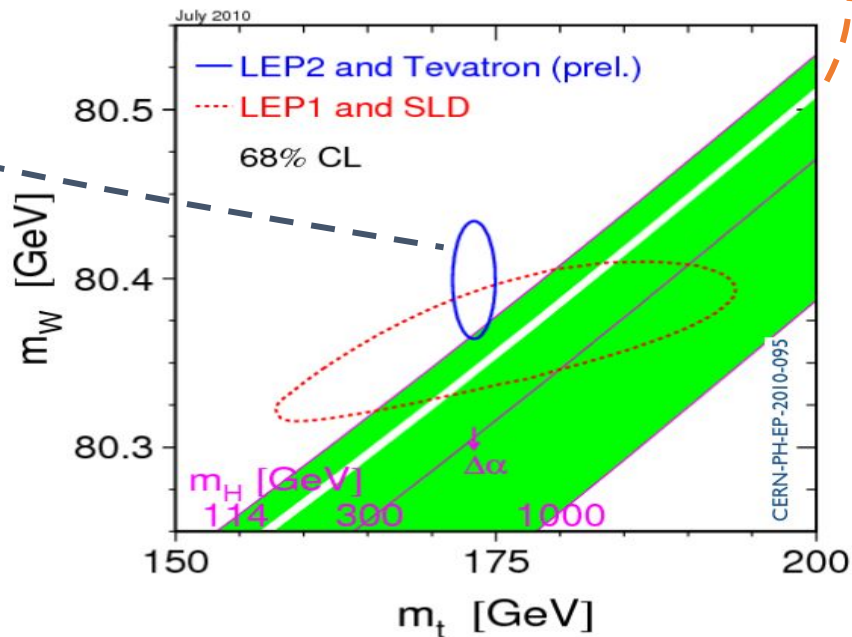
pesquisas directas excluem $m_H < 114 \text{ GeV}$ (95% CL) □



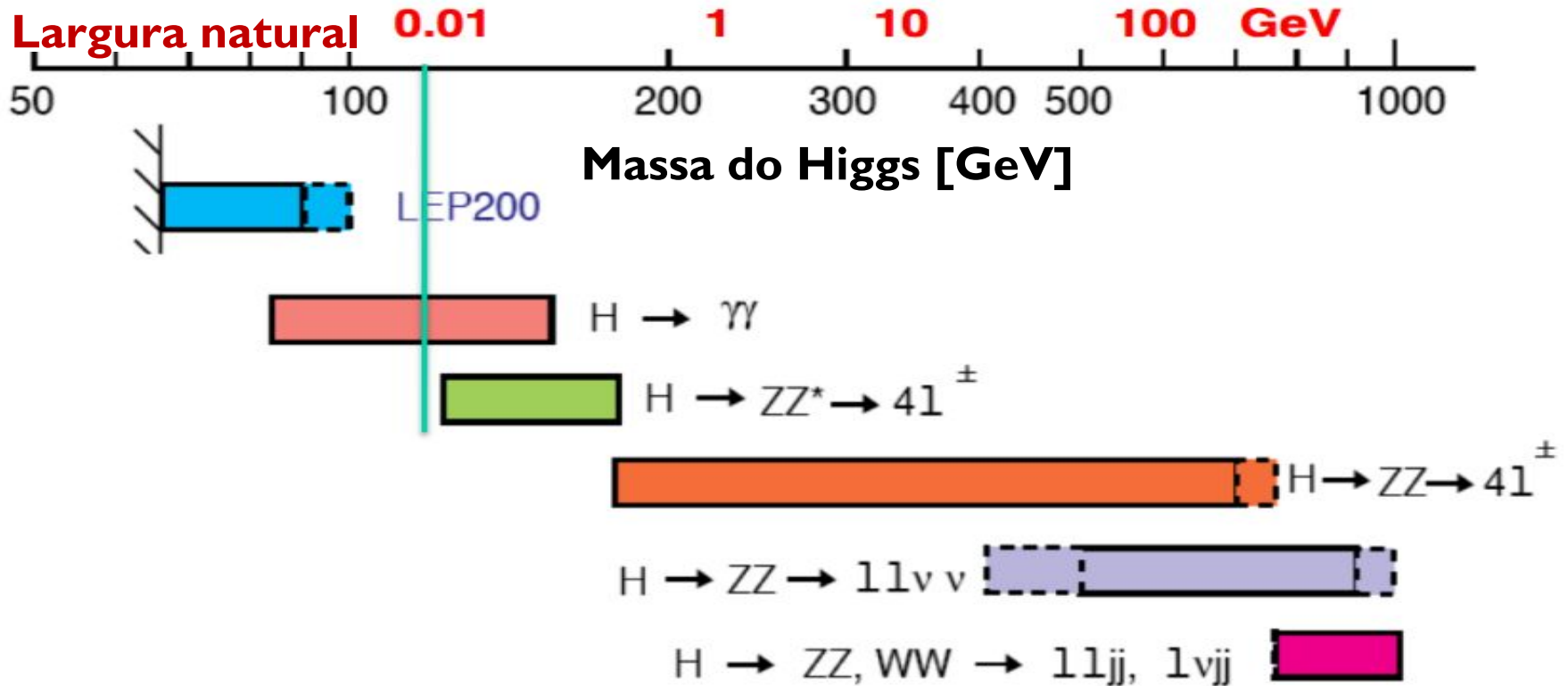
Panorama da física na alvorada do LHC IV

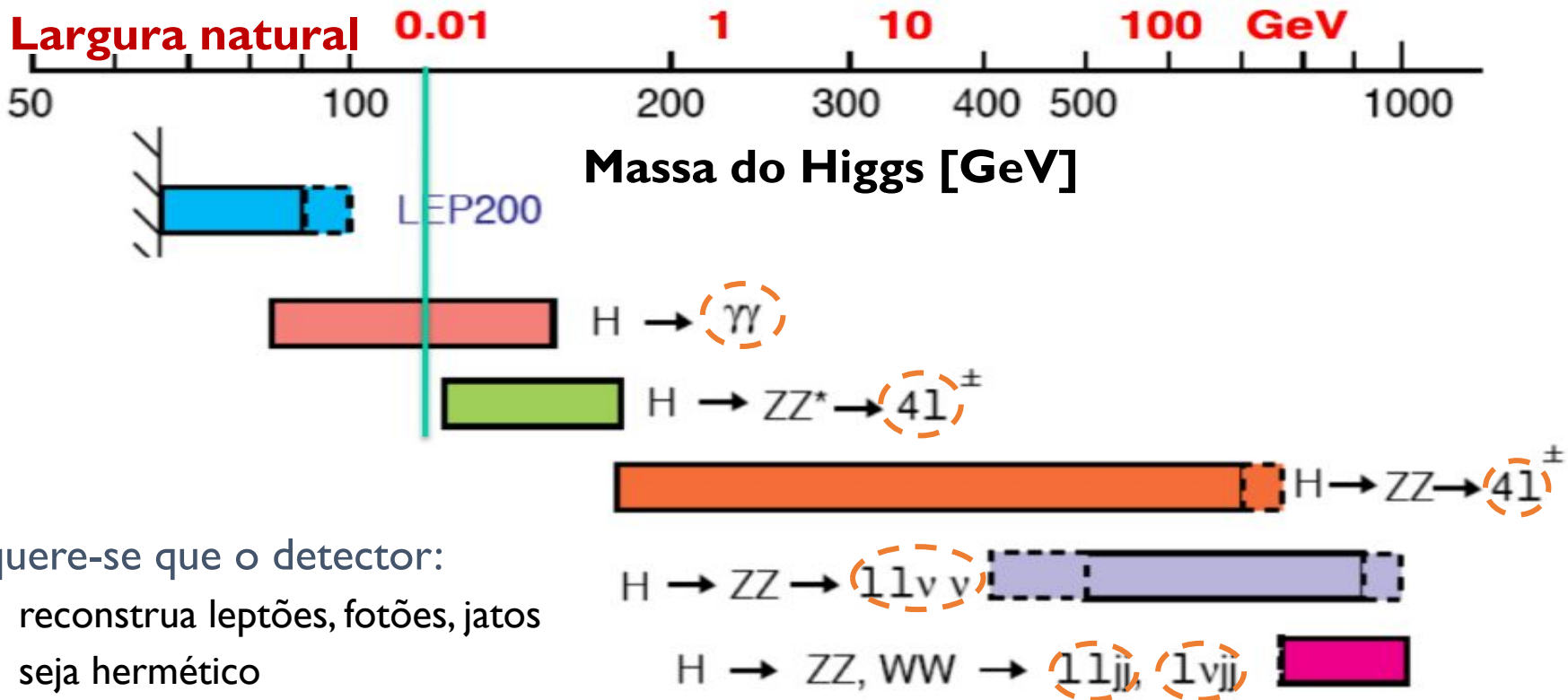
As experiências do Tevatrão (Fermilab)

- 1995: descobrem o quark top completando 3 gerações de quarks
- expandem apenas ligeiramente a janela de exclusão do Higgs



Se a massa do Higgs é desconhecida...





Requere-se que o detector:

- reconstrua leptões, fotões, jatos
- seja hermético
- cubra 4π em ângulo sólido

Construção e operação da experiência CMS

Da teoria à prática

O detector e os seus objectivos

*Propomos construir um **detector de uso geral** para funcionar à **luminosidade mais elevada do LHC**. O detector CMS foi optimizado para **pesquisar o bosão de Higgs** (como previsto pelo modelo padrão) numa região de massa entre os **90 GeV e os 1 TeV**; permitirá igualmente detectar uma extensa gama de estados finais produzidos em **modelos alternativos de quebra de simetria electro-frac**.*

Colaboração global

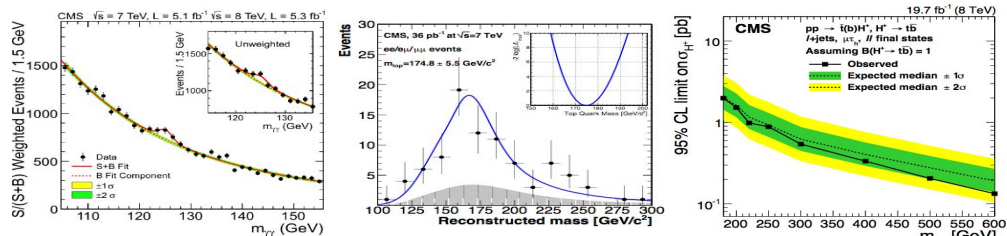
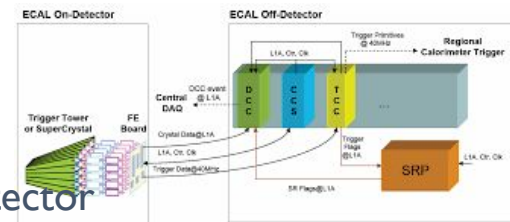
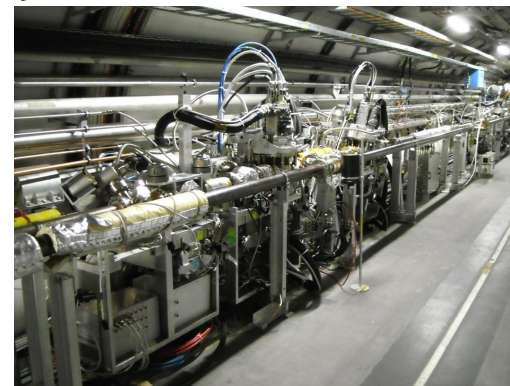
Empreendimento global de 180 institutos de 40 nações!



Participação portuguesa em CMS



mais @ <http://www.lip.pt/cms/>



Física: top, Higgs, SUSY, plasma qg, quarkonia

HW+SW: operação CMS, ECAL, CT-PPS, grid, actualização detector

Participação brasileira em CMS



São Paulo Research and Analysis Center (SPRACE)



Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF)



Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)



mais @ <http://cms.uerj.br/group/>
<https://www.sprace.org.br/>
<http://www.cbpf.br>

Física: modelo padrão, Higgs, nova física (exótica, SUSY), plasma qg

HW+SW: operação CMS, Grid, CT-PPS, HCAL, HF, actualização detector

Participação angolana em CMS ?



- Ainda não existe, quem sabe no futuro?

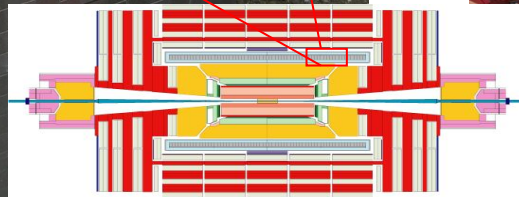
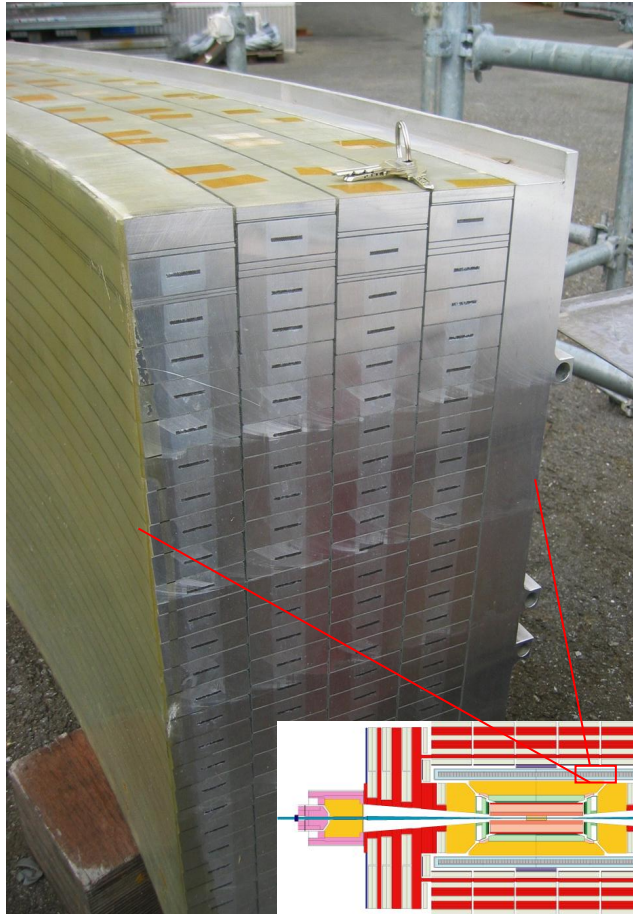
Membro da experiência CMS avistado em Benguela há alguns anos atrás...



1993-2008: I&D e construção do detector ²⁷

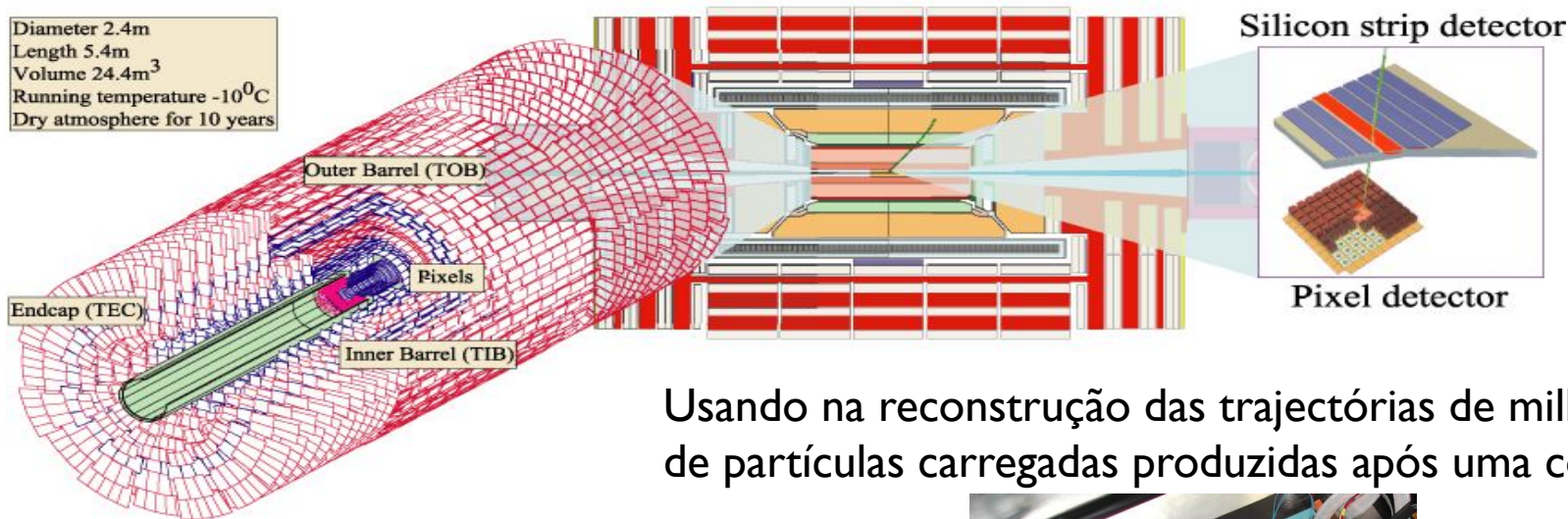


Solenóide super-condutor de 3.8 T



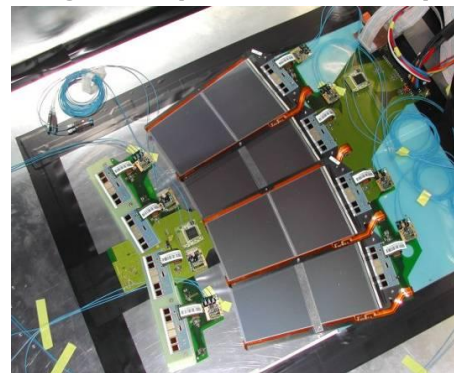
Tracejador de Silício

Diameter 2.4m
Length 5.4m
Volume 24.4m³
Running temperature -10⁰C
Dry atmosphere for 10 years



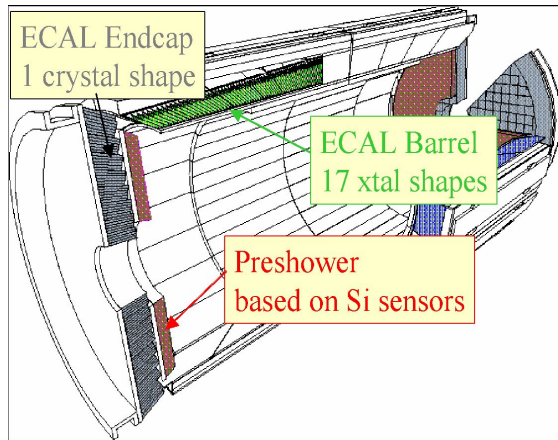
Usando na reconstrução das trajetórias de milhares de partículas carregadas produzidas após uma colisão

214m² sensores Si
11.4 milhões de tiras de Si
65.9 milhões de pixels de Si

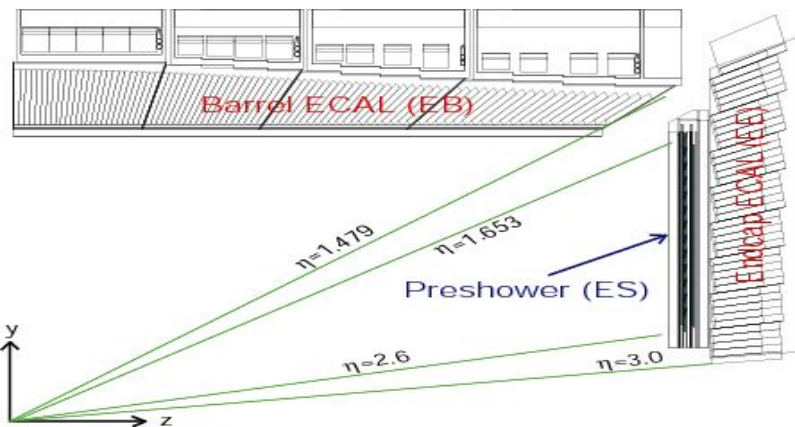




Calorímetro electromagnético



Detecção de fótons e electrões
 Cristais cintiladores de PbWO_4
 Lidos por fotodíodos de avalanche



Requerimento: medir a energia dos fótons de um decaimento Higgs com uma precisão $\leq 0.5\%$

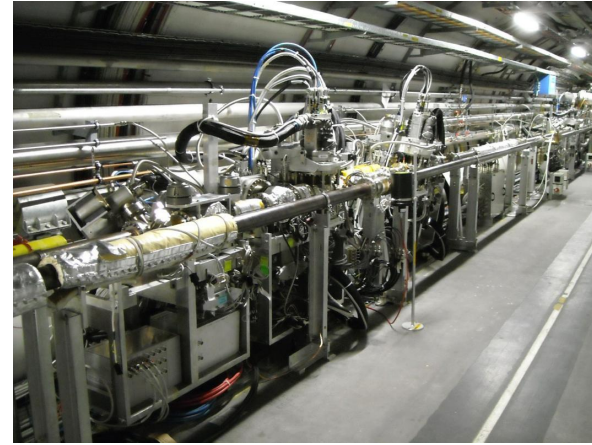
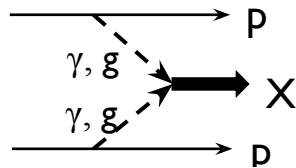
	Barril (EB)	Tampas (EE)
# cristais	61200	14648
Volume [m ³]	8.14	2.7
Massa total [t]	67.4	22.0



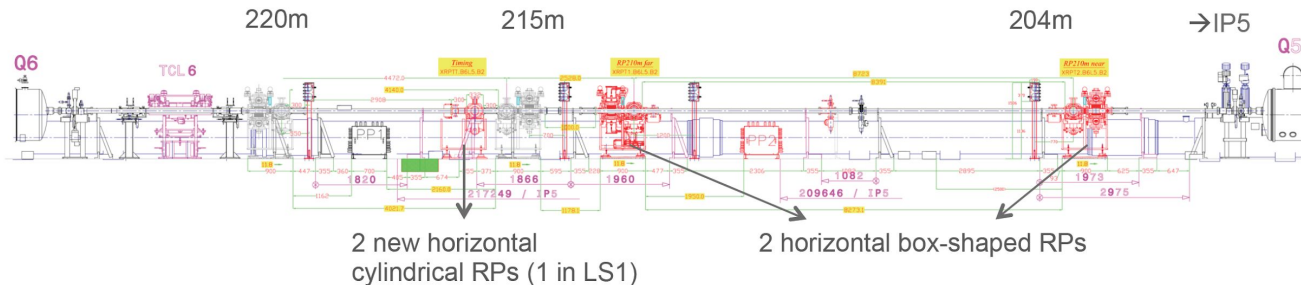
CT-PPS espectrómetro de prótons

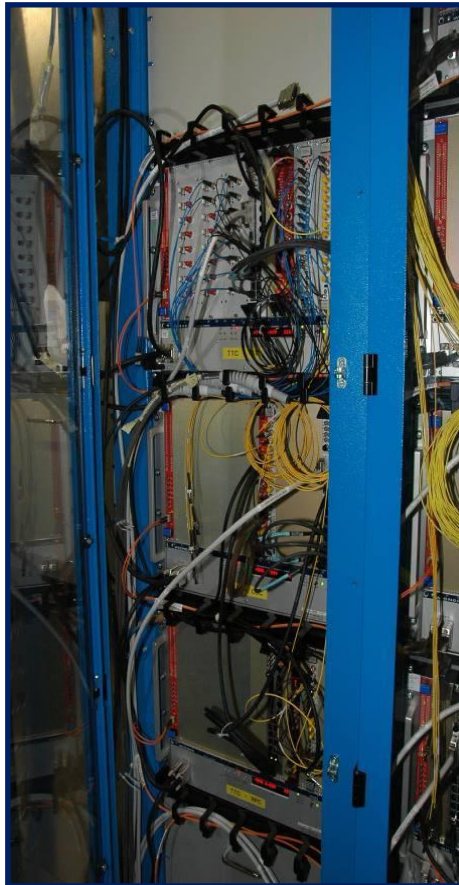
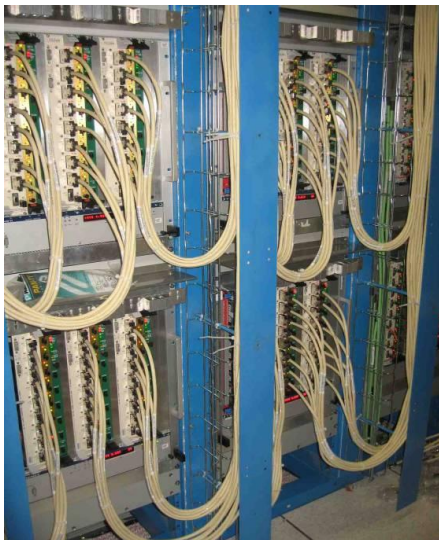
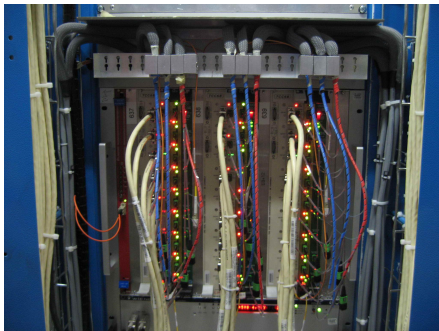
Dedicado a identificar colisões elásticas

- Protões sobrevivem à interacção
- são detectados a distâncias $>200\text{m}$
(desviam-se da trajectória do feixe)
- Interacção pura de mediadores fracos/fortes
- Processos raros: potencial para nova física

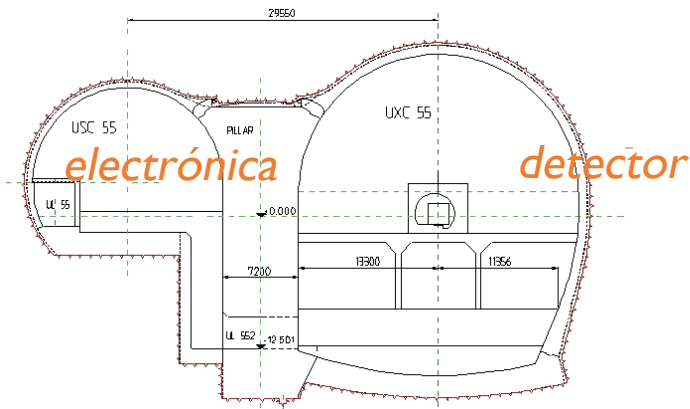


Projecto inicialmente liderado pelo Prof. João Varela e outros membros do grupo LIP-CMS, UERJ





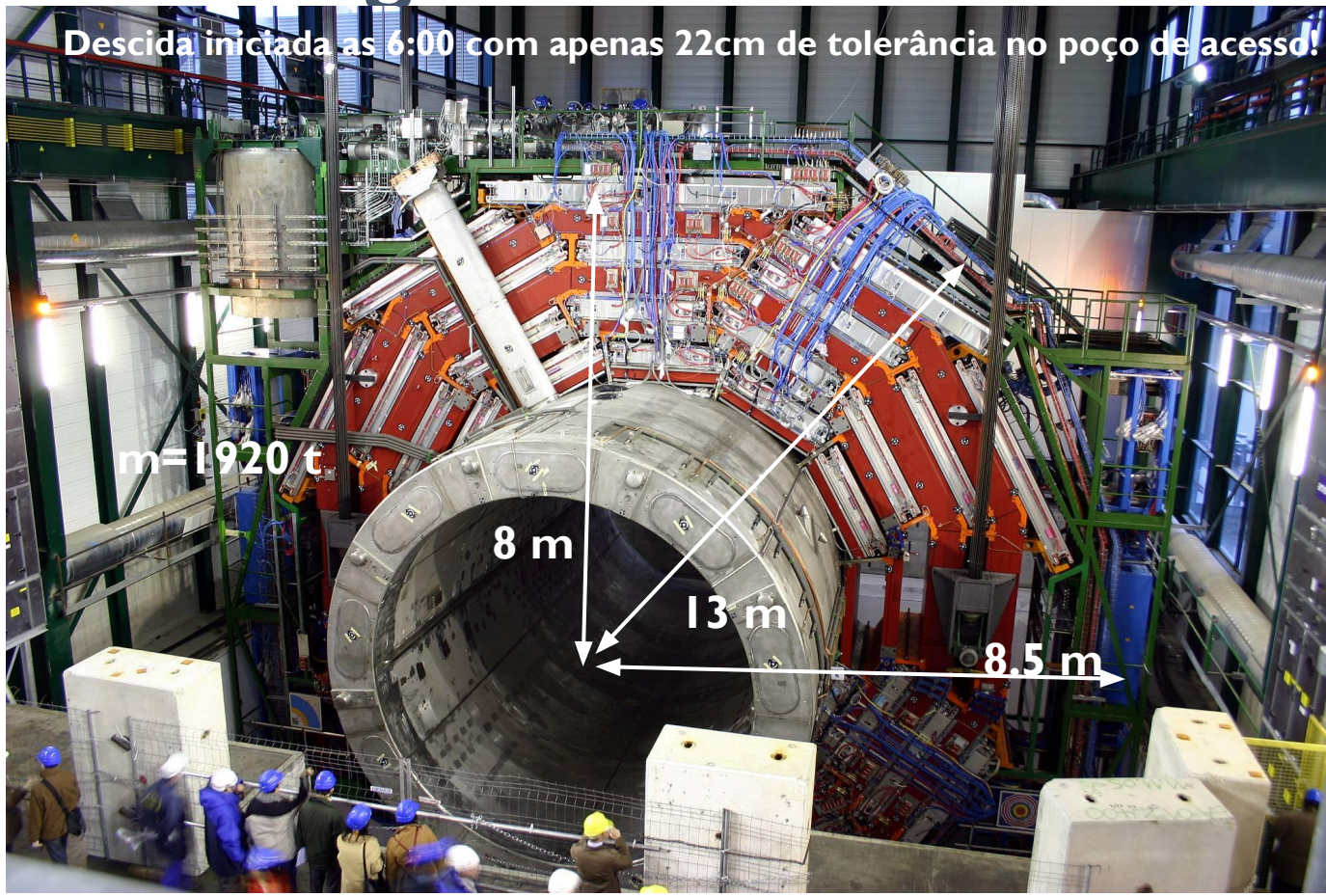
O sistema de electrónica encontra-se numa caverna de serviço, protegida da radiação: 2 andares com ≈ 150 prateleiras



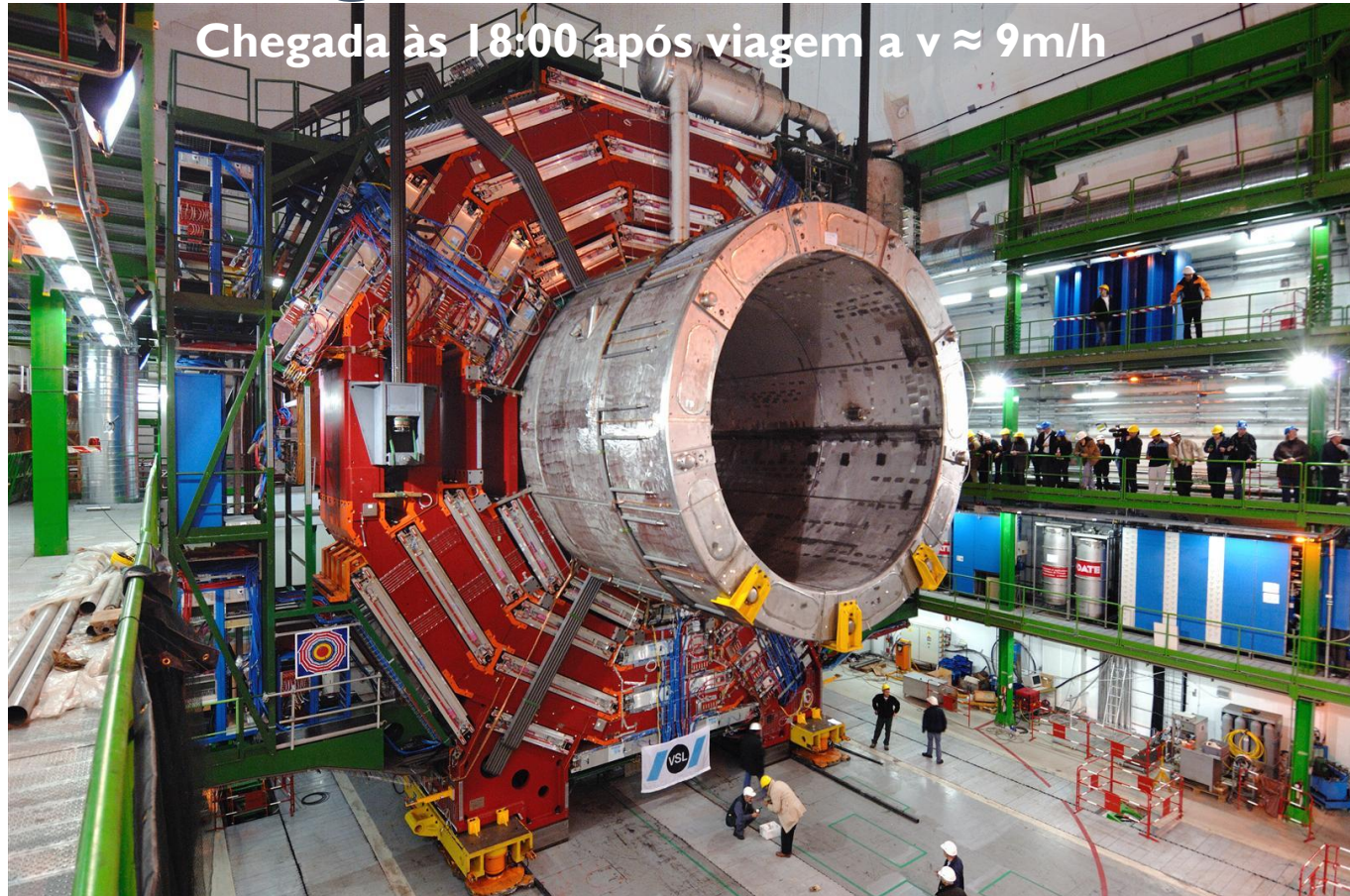
Arquitectura e implementação específicas à experiência CMS

2007: o magnete desce à caverna

Descida iniciada às 6:00 com apenas 22cm de tolerância no poço de acesso.



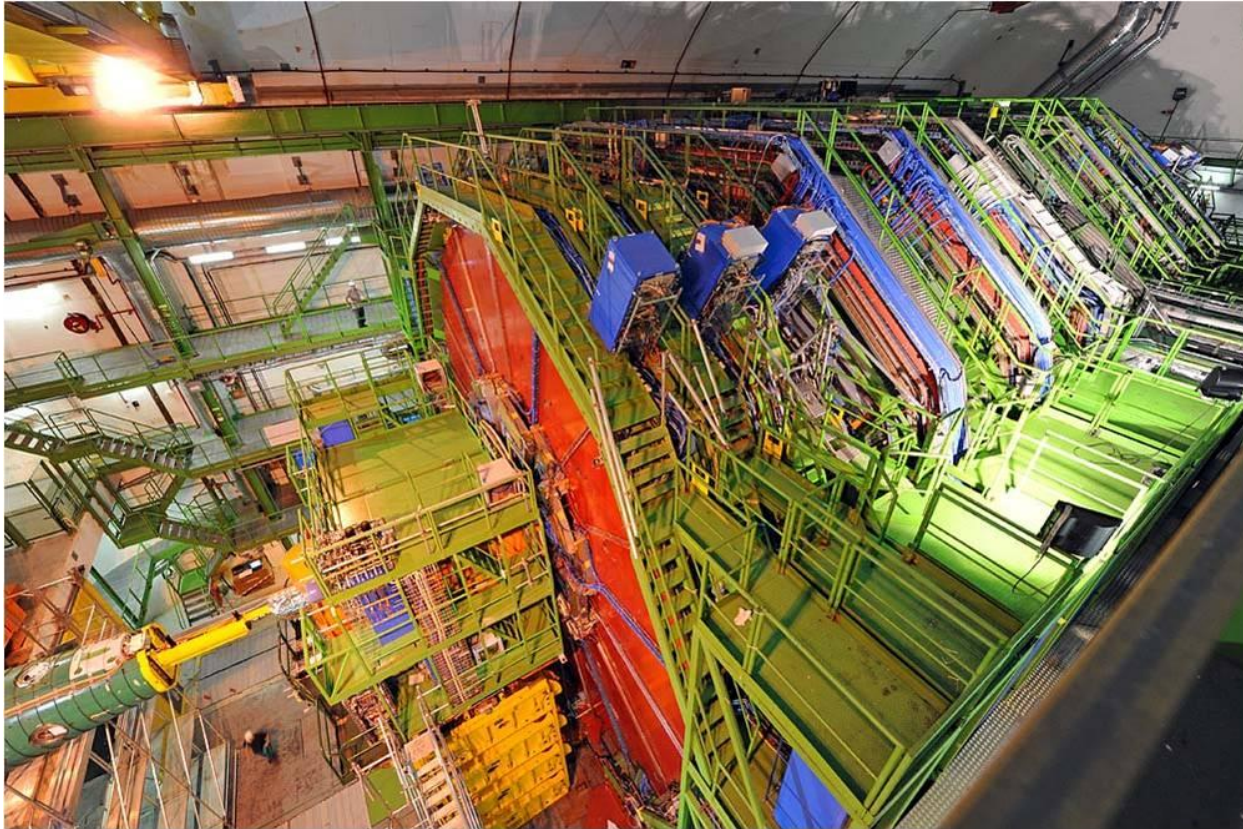
2007: o magnete desce à caverna



Construção e operação da experiência CMS

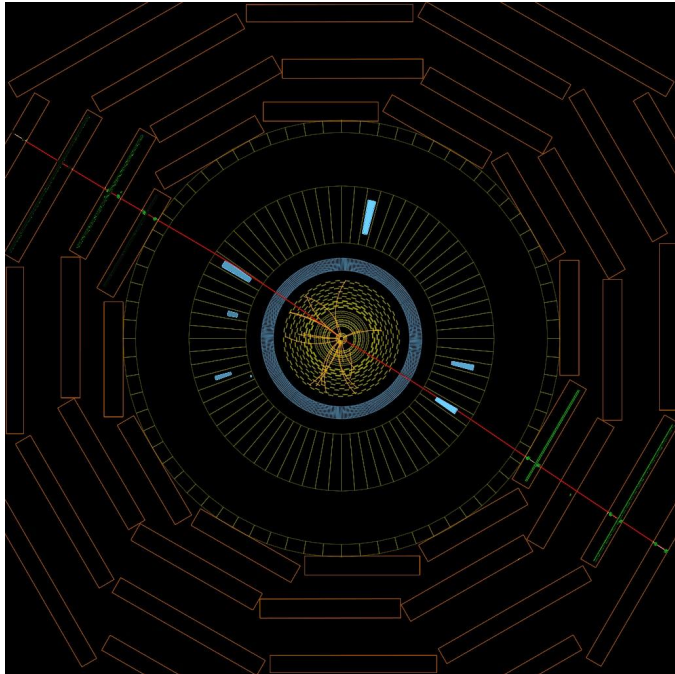
Setembro de 2008: CMS está pronta para registrar dados

35

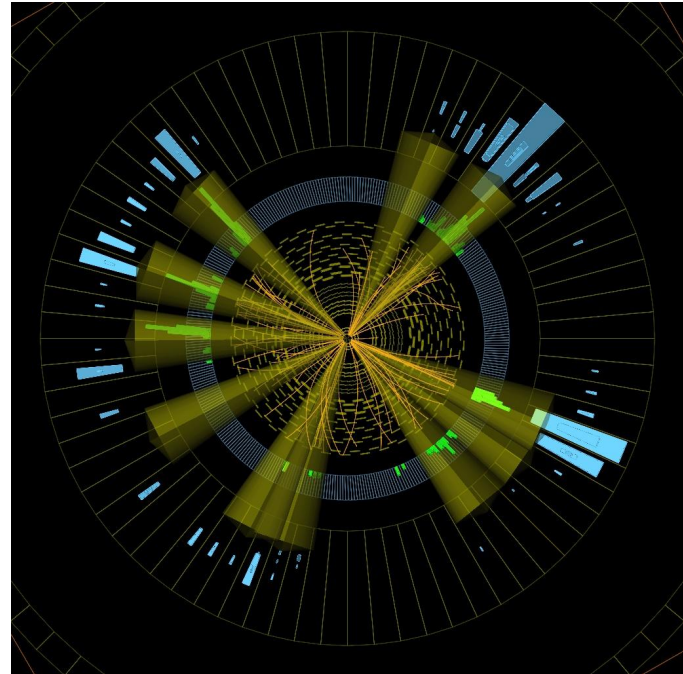


Eventos reais

$$Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

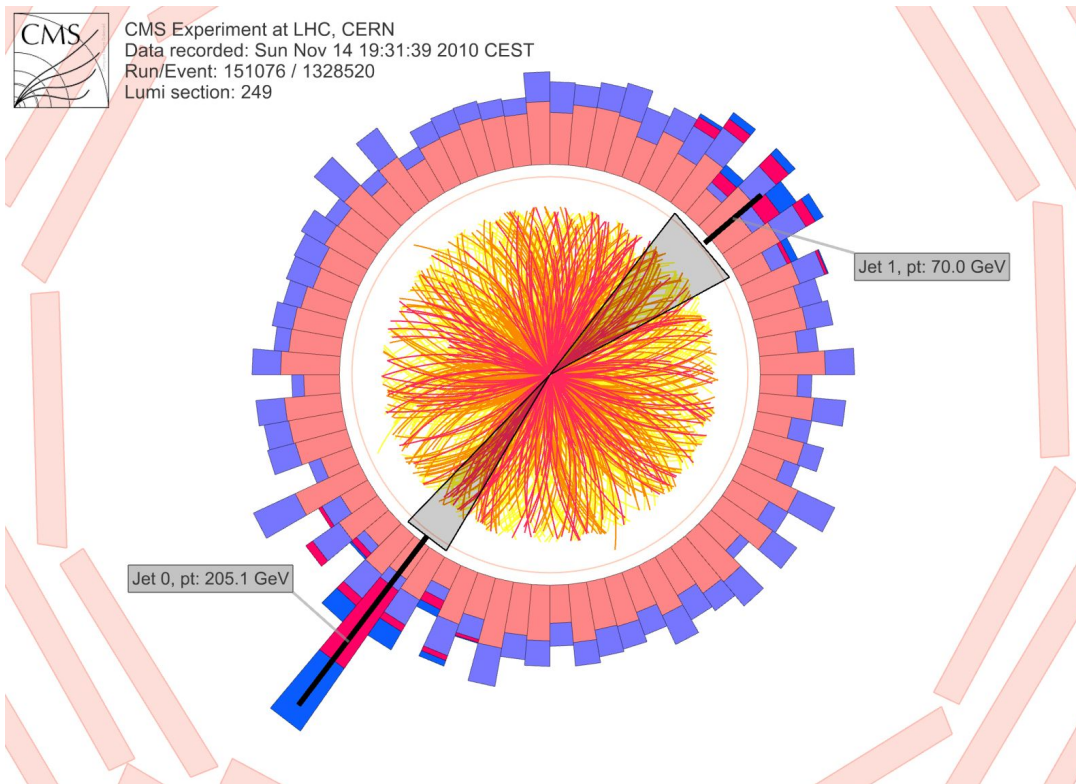


Múltiplos jatos



Eventos reais

Dois jatos após uma colisão PbPb



As primeiras descobertas

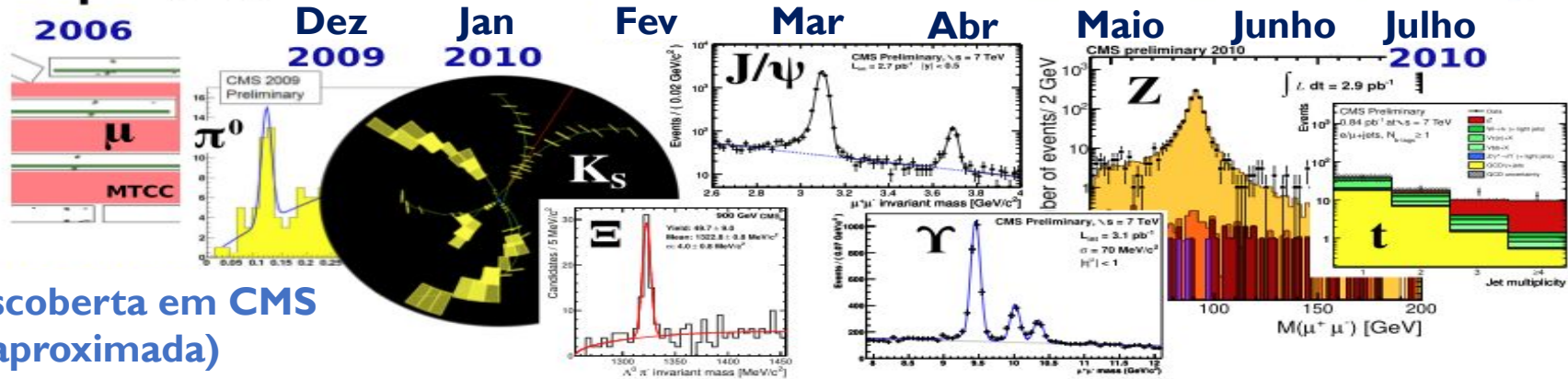
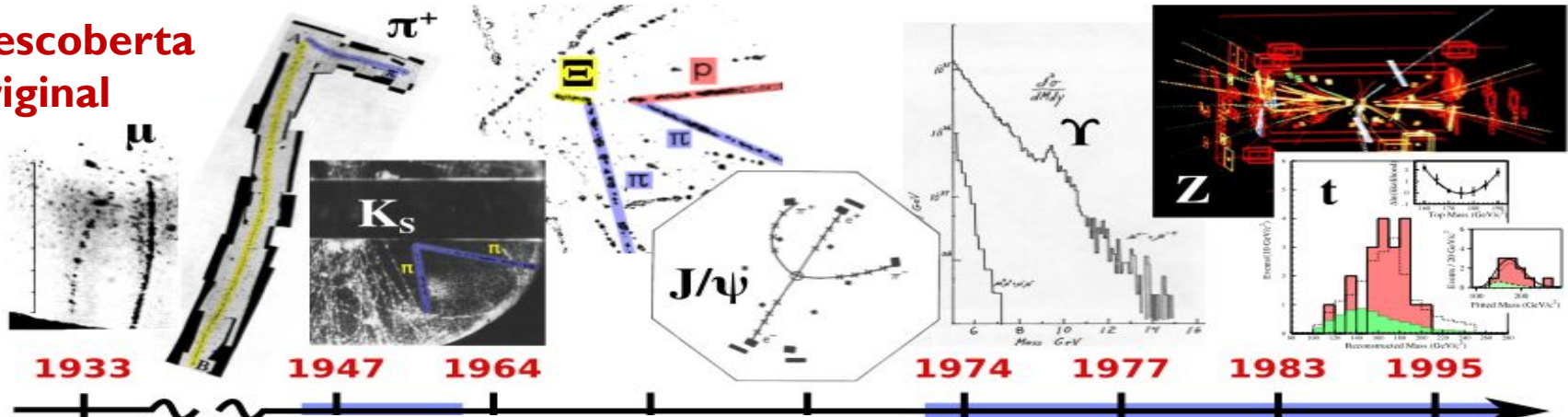
Um século de Física em menos de um segundo no LHC

O bóson Higgs

Outras supresas

As primeiras descobertas

Descoberta original



Re-descoberta em CMS
(data aproximada)

A luminosidade é o ingrediente principal

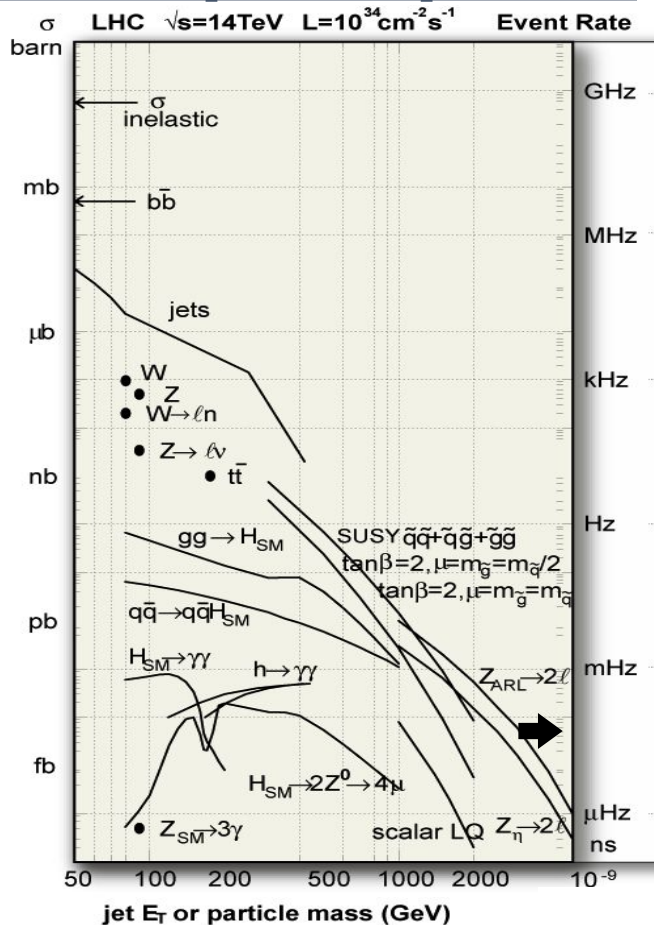
- A taxa de eventos é dada por:

$$\dot{N} = \mathcal{L} \cdot \sigma$$

Luminosidade [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]
 depende dos parâmetros do feixe: densidade, extensão espacial, frequência...

Secção eficaz [$\text{barn} = 10^{-24}\text{cm}^2$]
 depende da energia transferida, dos constituintes do próton, da intensidade da interacção fundamental...

Potencial para produzir todas as partículas descobertas no sec. XX em aproximadamente 200ms!



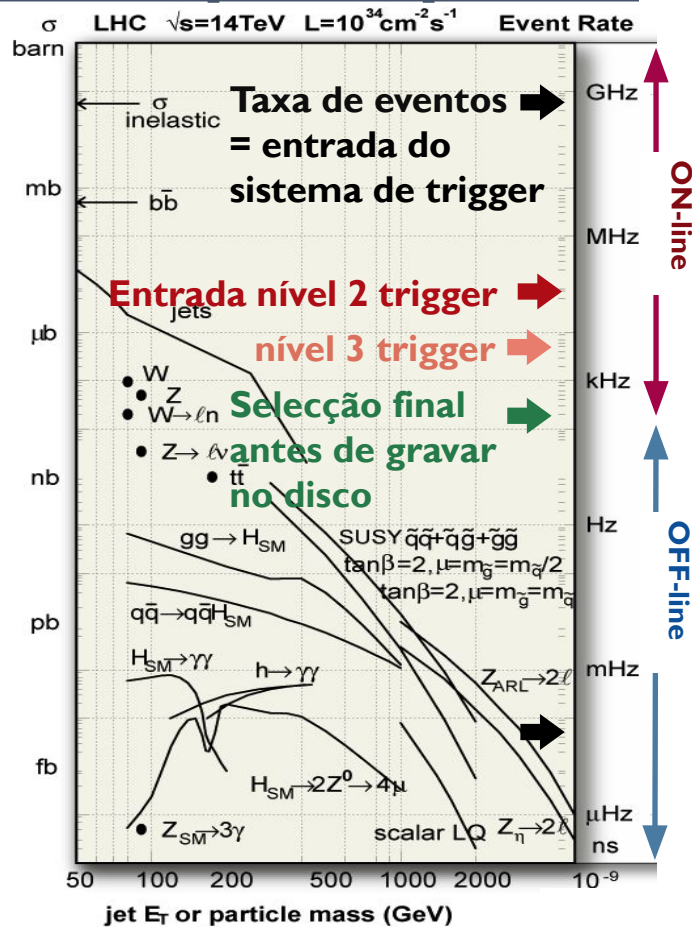
A luminosidade é o ingrediente principal

- A taxa de eventos é dada por:

$$\dot{N} = \mathcal{L} \cdot \sigma$$



Potencial para produzir todas as partículas descobertas no sec. XX em aproximadamente 200ms!



Em busca do Higgs (pequeno formulário)⁴²

- De acordo com a teoria da relatividade (Einstein)

$$E^2 = p^2 + M^2 \Leftrightarrow M^2 = E^2 - p^2$$

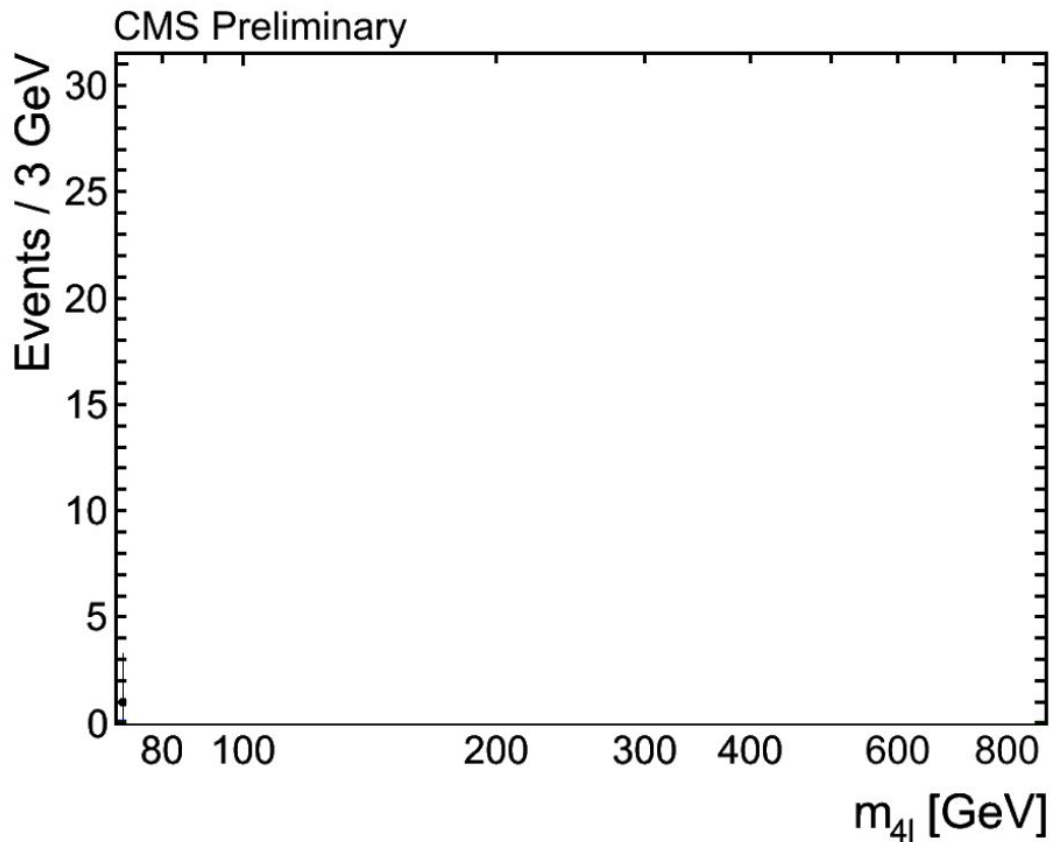
- O bóson de Higgs é instável: decai em pares de partículas

- Se duas partículas observadas resultam de um decaimento

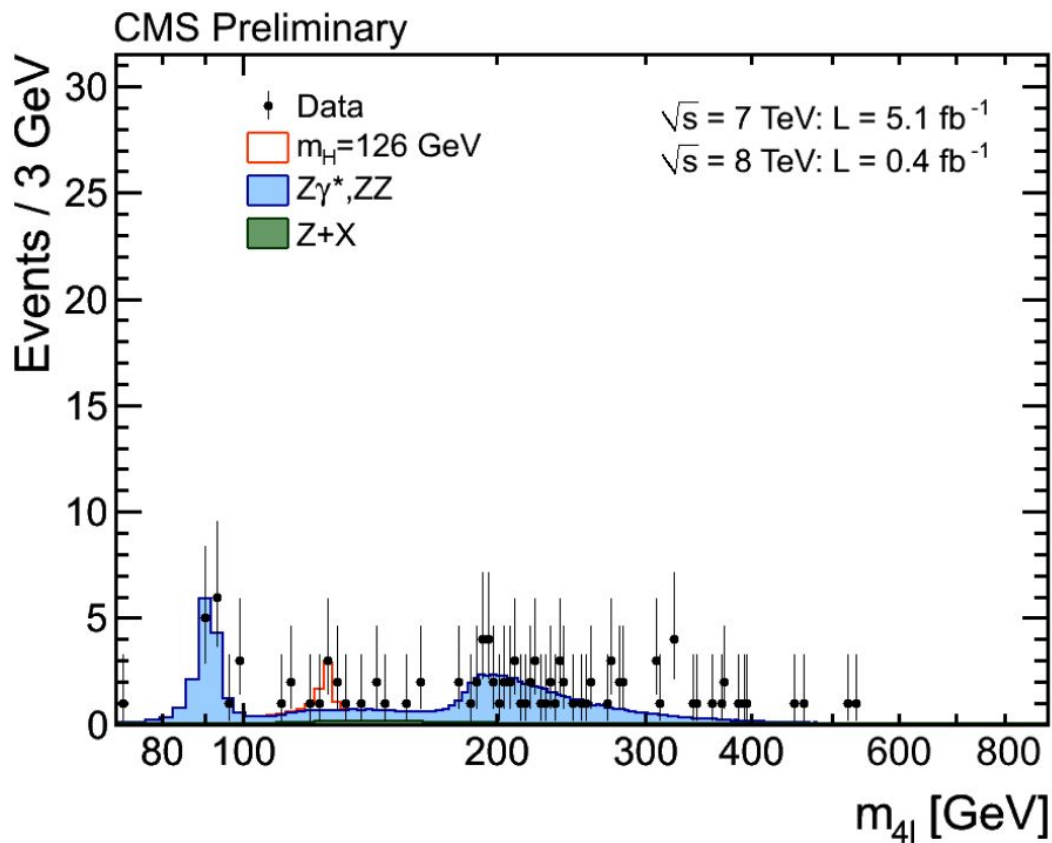
$$M^2 = (E_A + E_B)^2 - \|\vec{p}_A + \vec{p}_B\|^2 = 2E_A E_B (1 - \cos \theta_{A,B})$$

- “basta-nos” contar quantos pares têm uma massa na vizinhança de M
- se os dados preferirem M fixo encontramos uma ressonância 😊

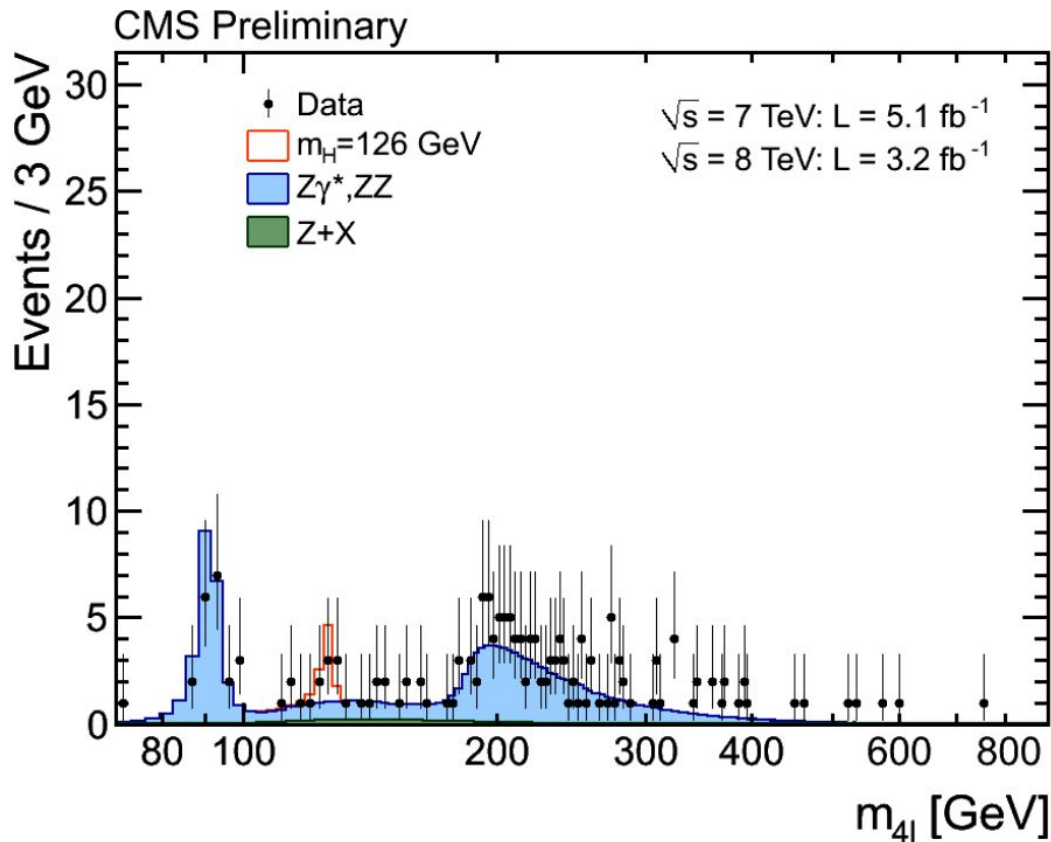
Em busca do Higgs com pares ZZ



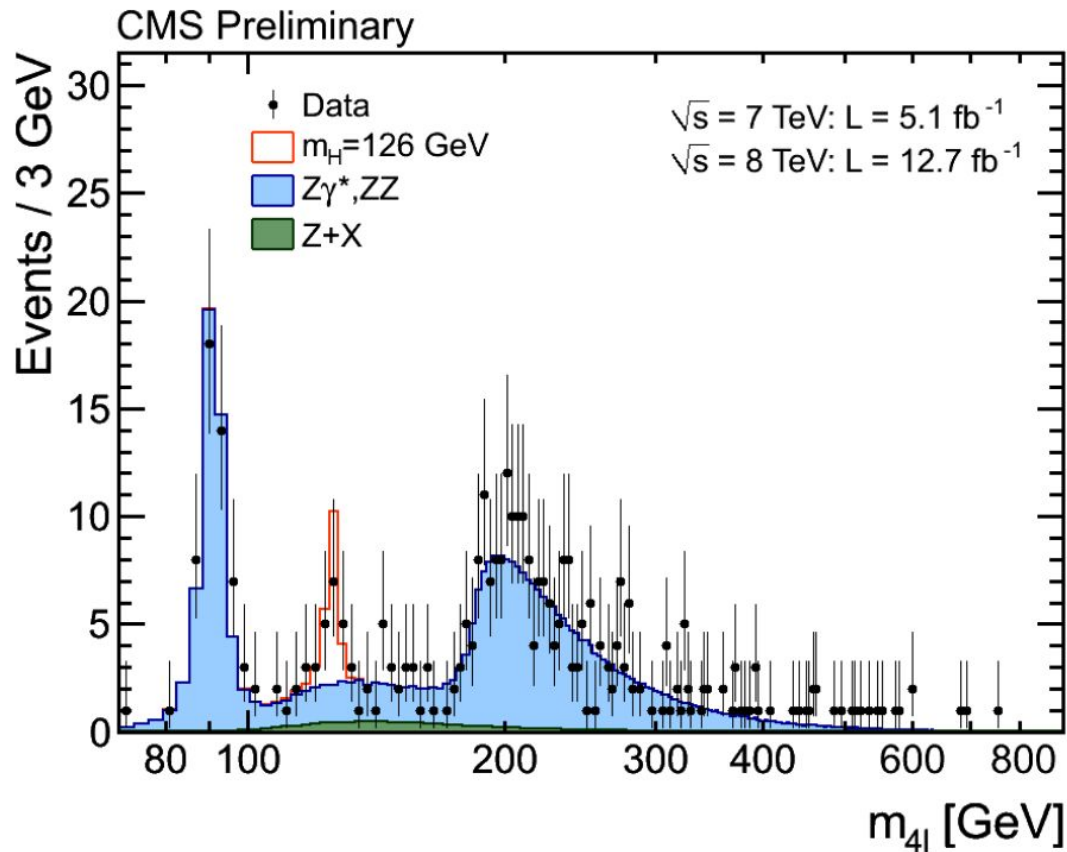
Em busca do Higgs com pares ZZ



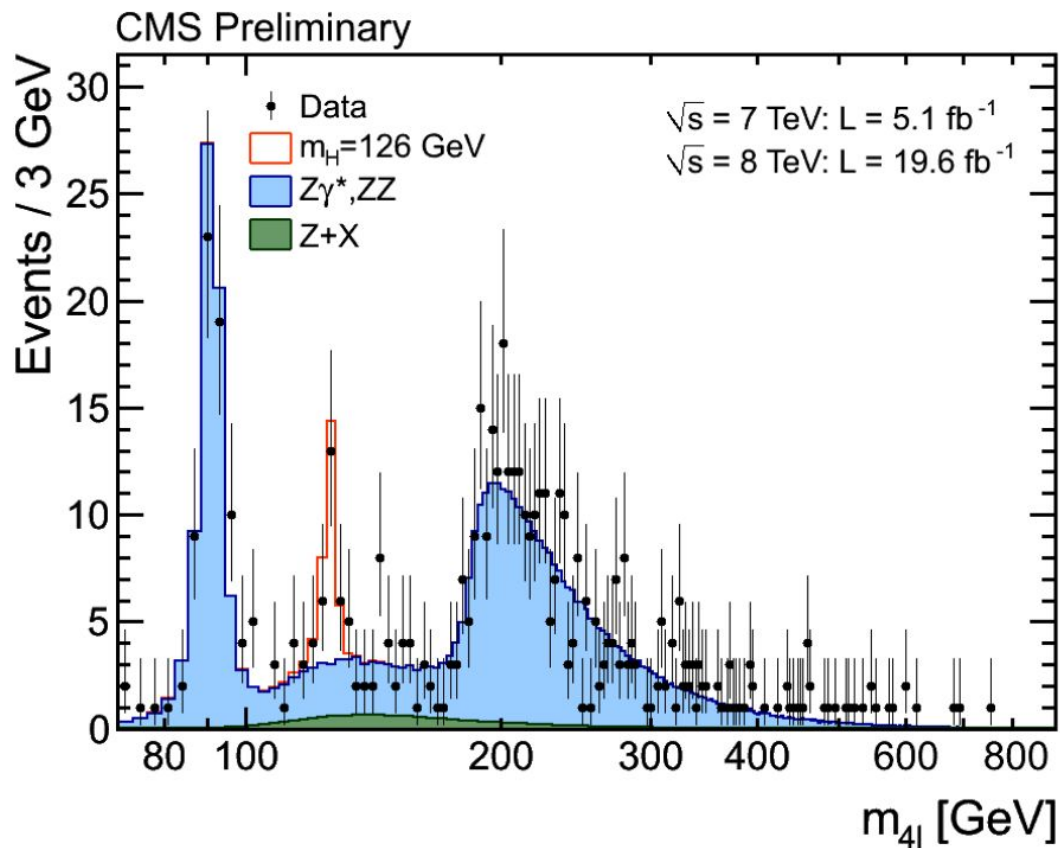
Em busca do Higgs com pares ZZ



Em busca do Higgs com pares ZZ



Em busca do Higgs com pares ZZ

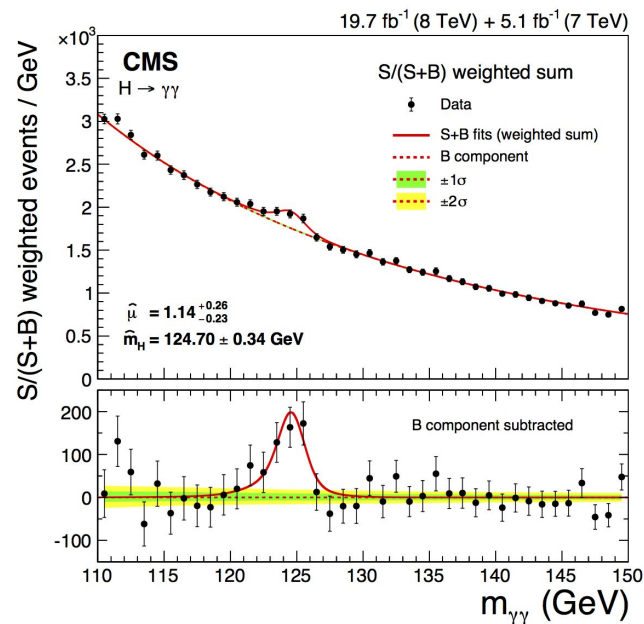
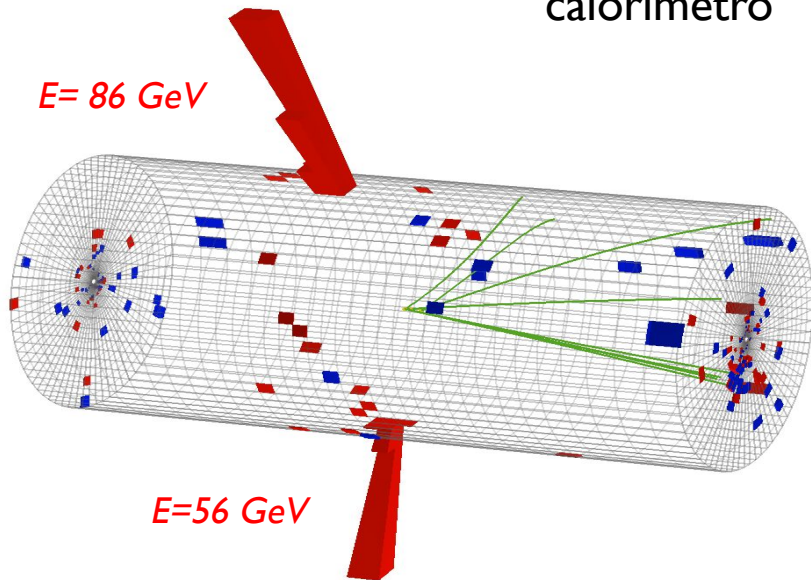


Em busca do Higgs com pares $\gamma\gamma$

$$M^2 = 2E_A E_B (1 - \cos \theta_{A,B}) \Rightarrow \frac{\Delta M}{M} \sim \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta E_A}{E_A} \oplus \frac{\Delta E_B}{E_B} \oplus \cot \frac{\theta_{A,B}}{2} \Delta \theta_{A,B} \right]$$

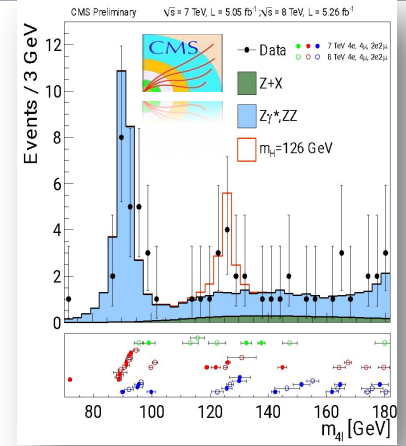
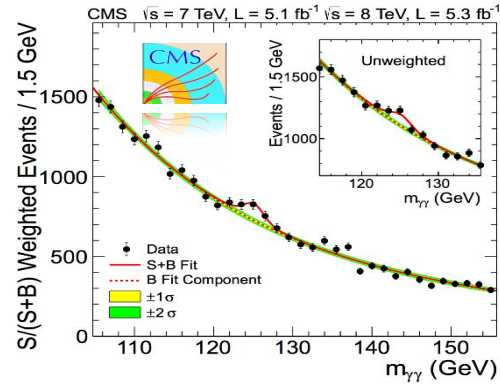
Resolução do calorímetro

Granularidade + identificação do ponto de produção (=vértice primário)



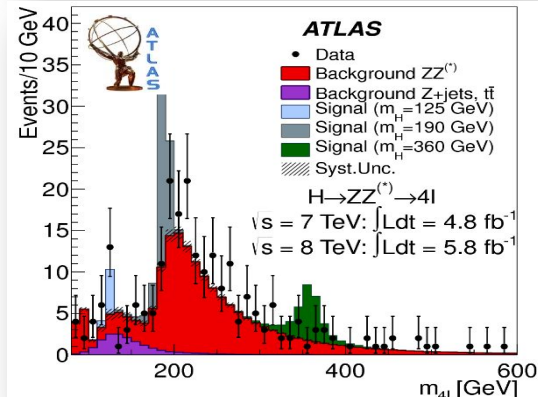
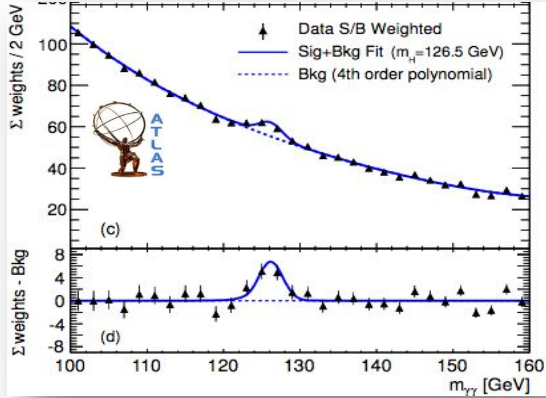
As primeiras descobertas

4 de Julho de 2012: Higgs encontrado em CMS!



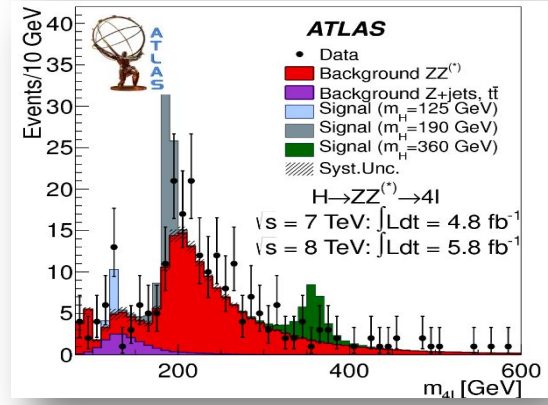
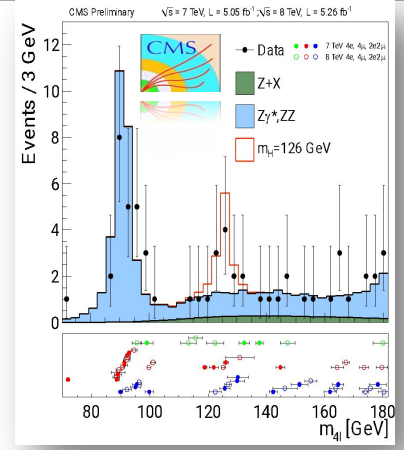
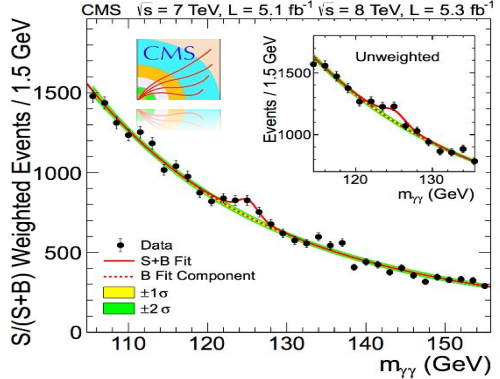
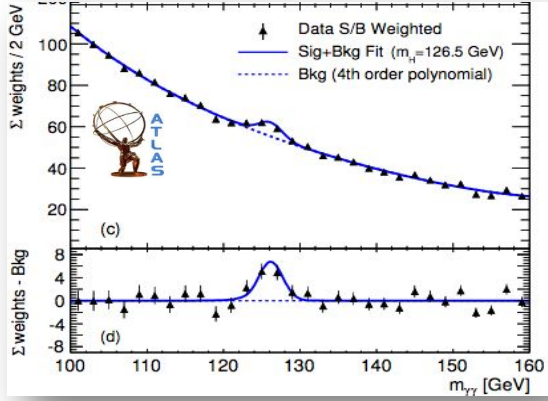
As primeiras descobertas

4 de Julho de 2012: Higgs encontrado em ATLAS!



As primeiras descobertas

4 de Julho de 2012: Higgs encontrado no CERN!



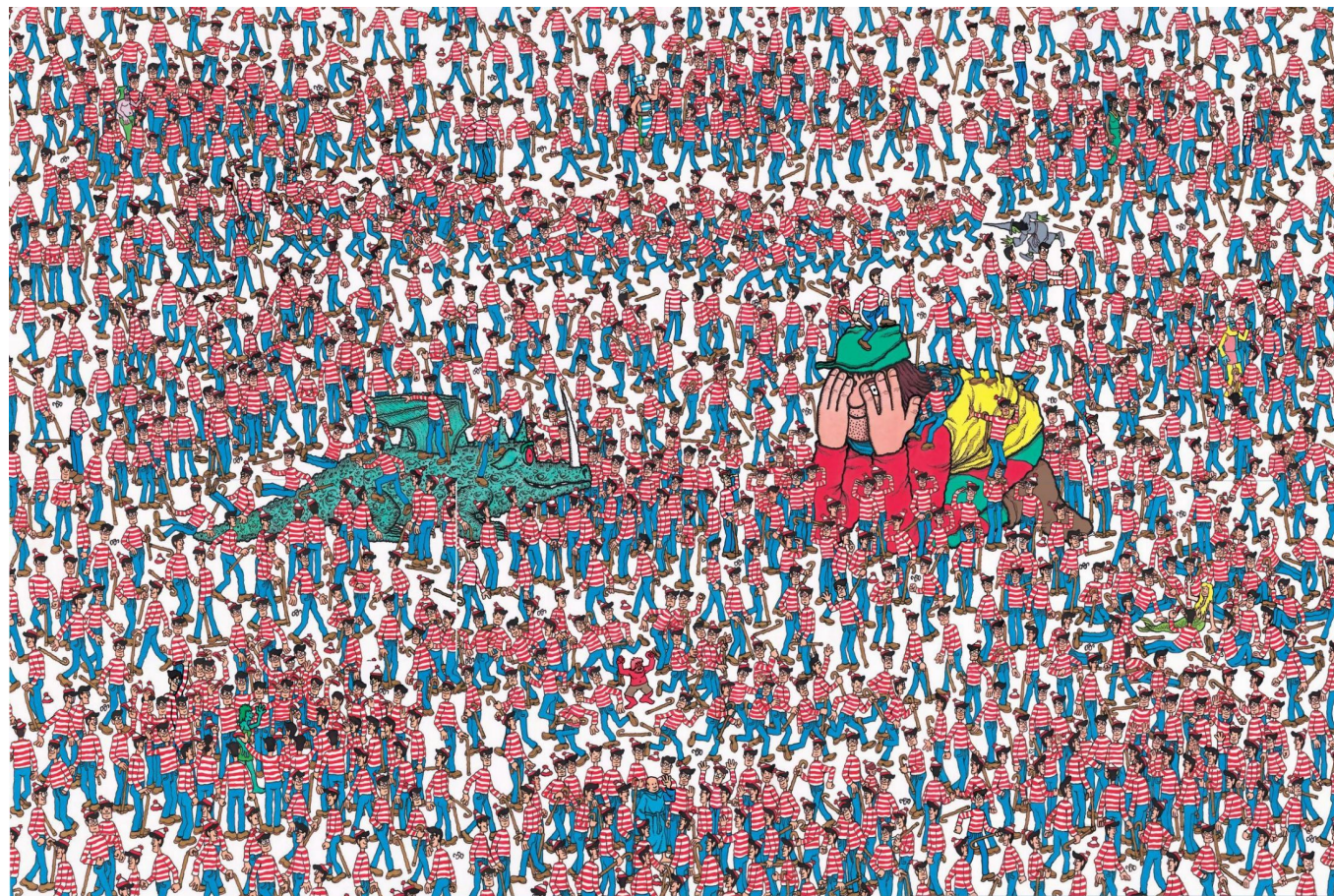
As primeiras descobertas

4 de Julho de 2012: no restaurante do CERN



Mas... que Higgs foi encontrado?

53



Será o Higgs do model padrão?*

- Para responder comparamos as taxas medidas com as esperadas

$$\dot{N} = \mathcal{L} \cdot \sigma \rightarrow \text{Secção eficaz [barn=10}^{-24}\text{cm}^2\text{]} \text{ aqui entra a teoria}$$

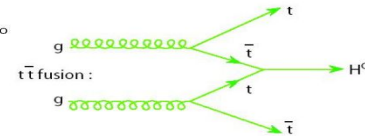
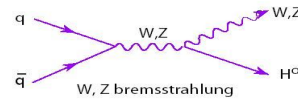
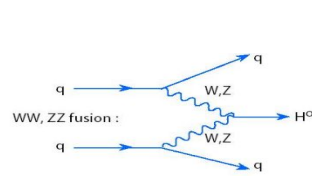


*NB a pergunta deverá antes ser formulada como: “conseguimos excluir o Higgs do modelo padrão?”

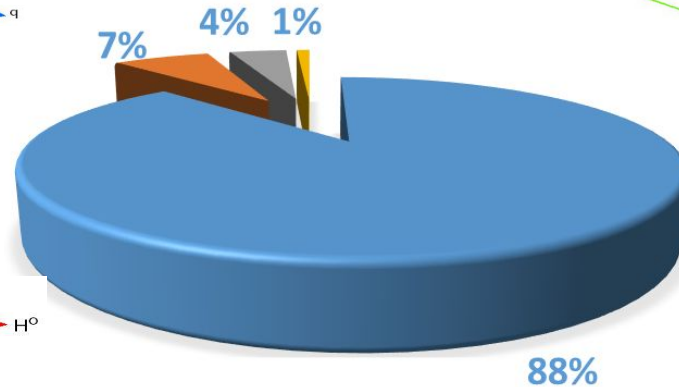
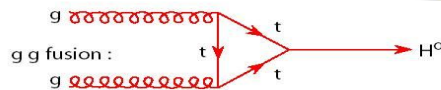
Será o Higgs do model padrão?

- Para responder comparamos as taxas medidas com as esperadas

$\dot{N} = \mathcal{L} \cdot \sigma$ → **Secção eficaz [barn= 10^{-24}cm^2]** aqui entra a teoria com que probabilidade o Higgs **é produzido?**



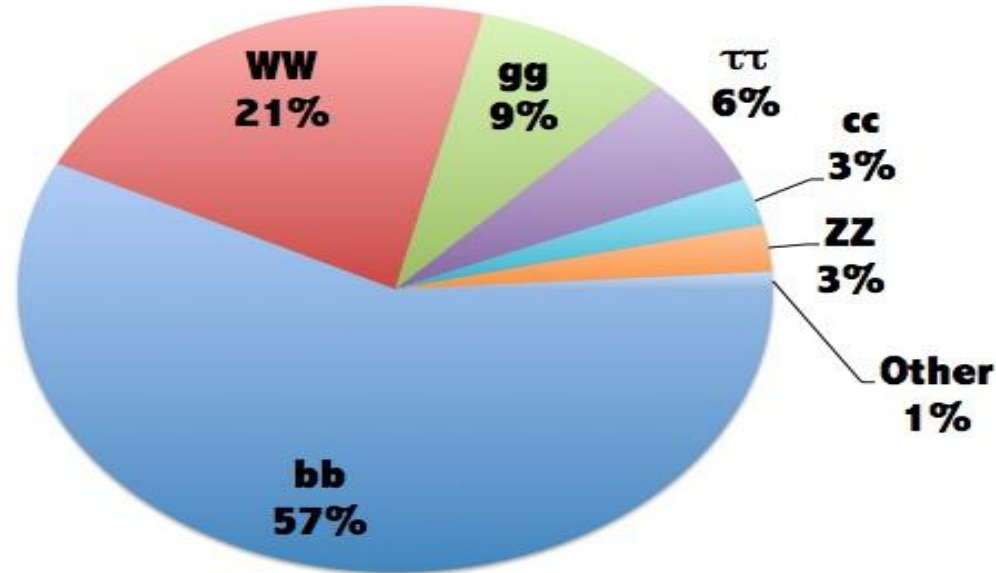
$\sigma = 55.1 \text{ pb}$
 $= 55.1 \times 10^{-36} \text{ cm}^{-2}$

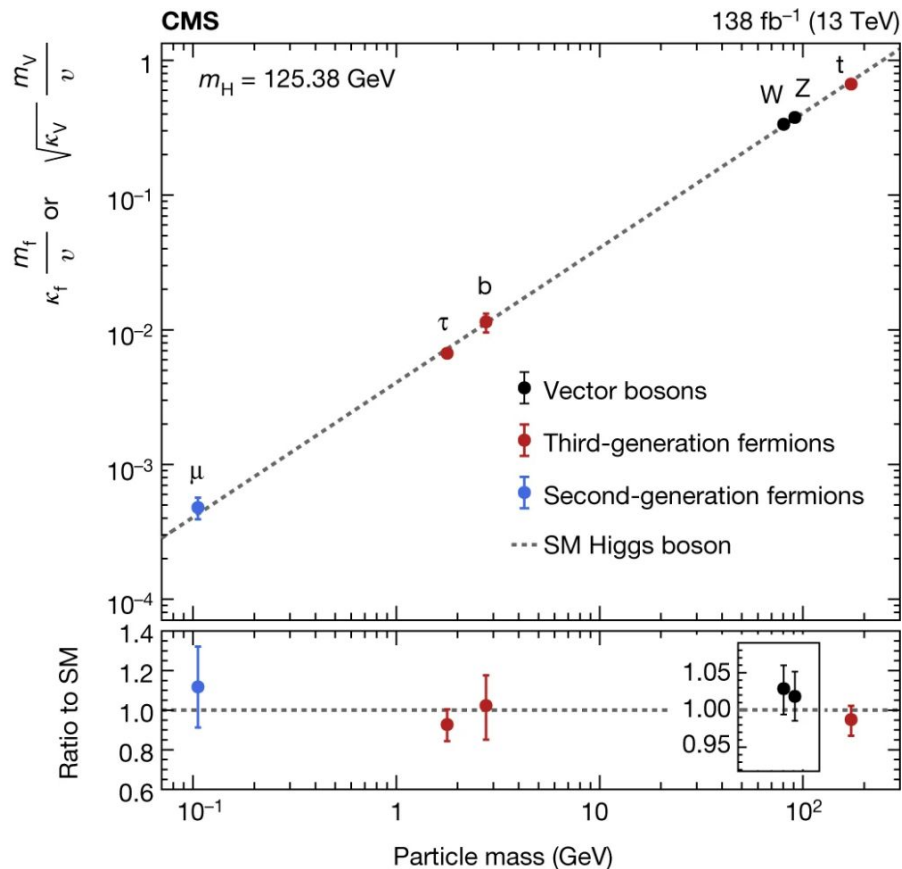


Será o Higgs do model padrão?

- Para responder comparamos as taxas medidas com as esperadas

$\dot{N} = \mathcal{L} \cdot \sigma$ → Secção eficaz [barn= 10^{-24}cm^2] aqui entra a teoria com que probabilidade o Higgs é produzido? **se fragmenta?**



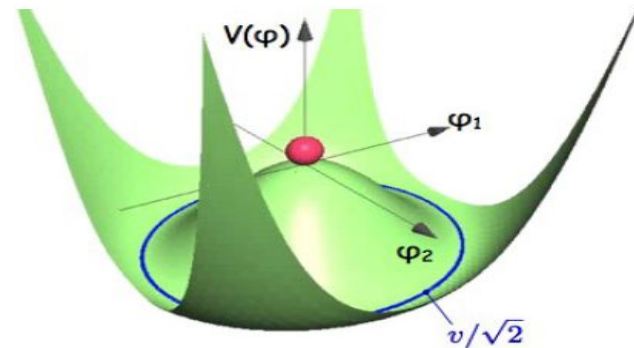


Até hoje : tudo indica que interage tal como se espera no Higgs do modelo padrão

Uma descoberta fundamental foi feita!

A nova partícula é um bóson de Higgs

- não é apenas mais uma partícula
- o campo de Higgs permeia o Universo
- será este o único do seu género?



Uma nova peça nos modelos cosmológicos

- qual a sua contribuição na inflação após o big-bang?
- será a energia do campo de Higgs a fonte de matéria do Universo?

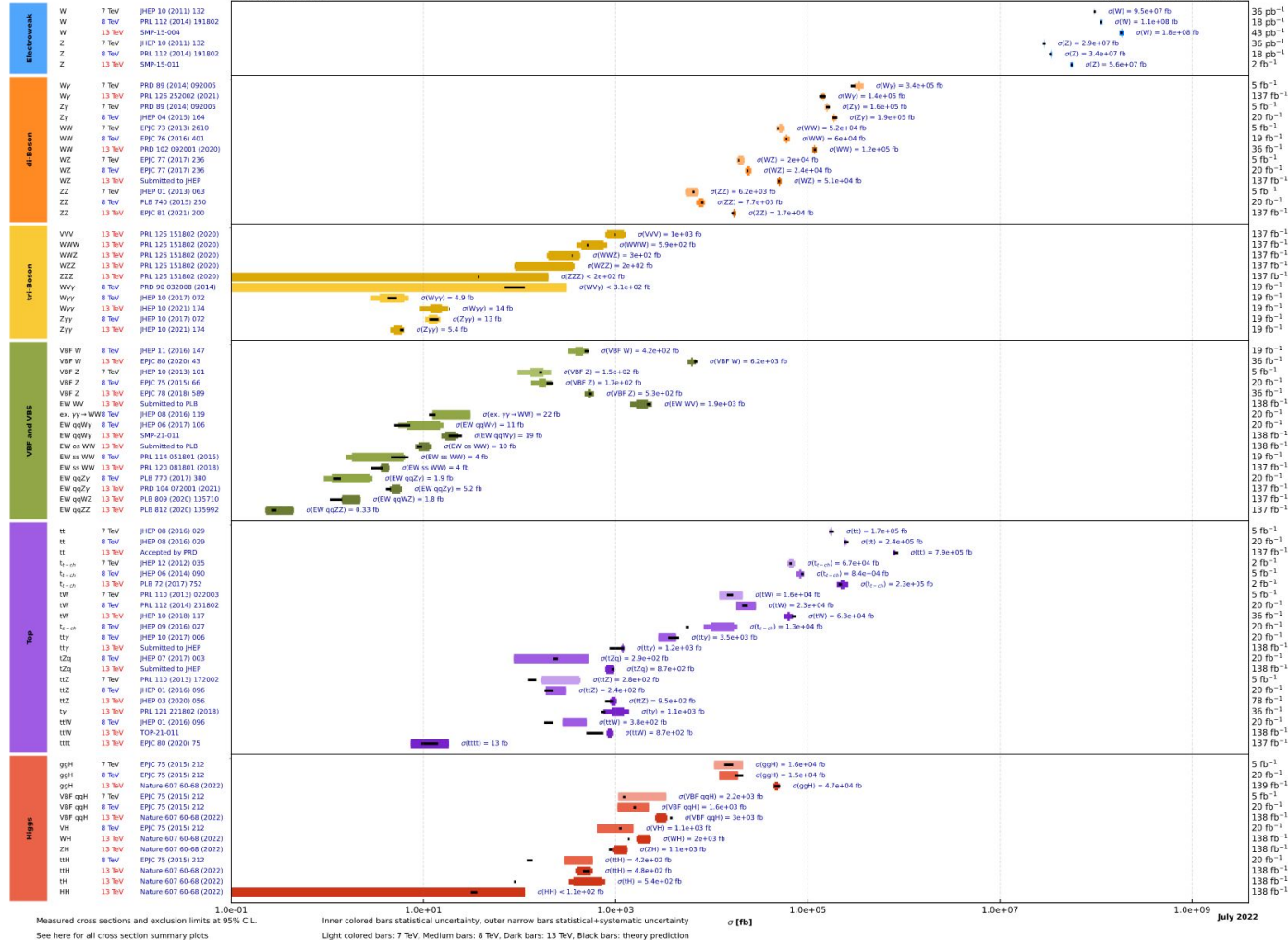
GPS para a física do LHC na era (pós-)Higgs

Física das altas energias no LHC, Quo vadis?

Algumas expectativas para a fronteira da intensidade

Overview of CMS cross section results

18 pb⁻¹ · 138 fb⁻¹ (7.8,13 TeV)

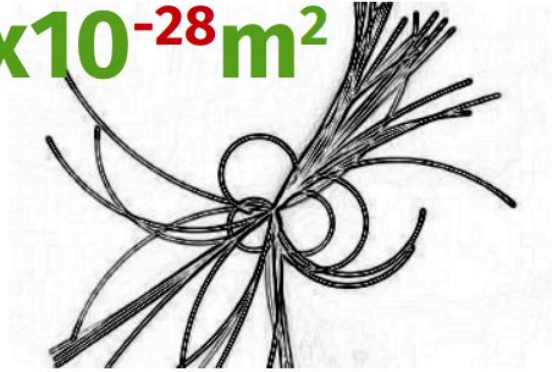


...mas sabemos que descreve apenas 4% do nosso universo...

...ok, e então?

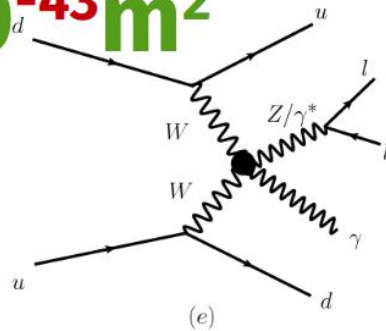
Secção eficaz inelástica:

$70 \times 10^{-28} \text{ m}^2$



$pp \rightarrow Z\gamma qq$:

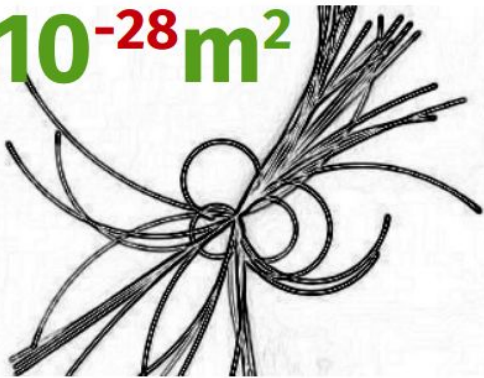
$15 \times 10^{-43} \text{ m}^2$



Descobrimos pequenas maravilhas...

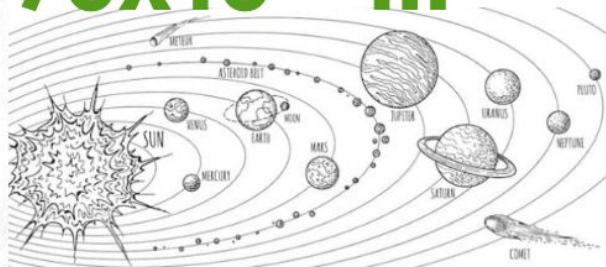
Secção eficaz inelástica:

$$70 \times 10^{-28} \text{ m}^2$$



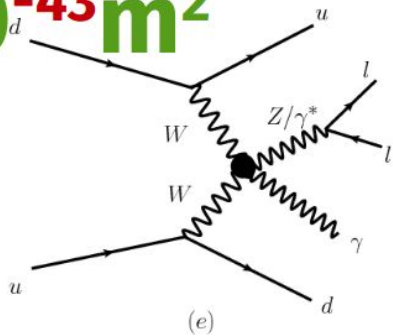
Sistema solar:

$$70 \times 10^{+20} \text{ m}^2$$



$pp \rightarrow Z\gamma qq$:

$$15 \times 10^{-43} \text{ m}^2$$



$O(100 \text{ m})$

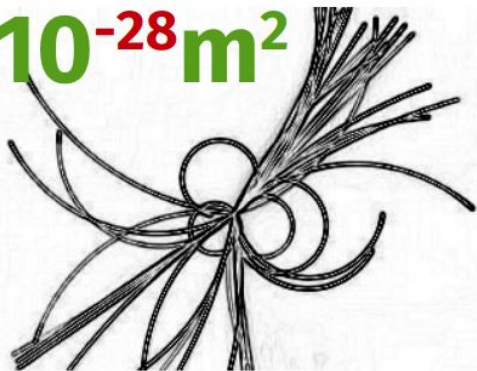
Cascata de Kalandula
Pão de açúcar
Ponte 25 de Abril



...recriando instantes próximos do Big-Bang

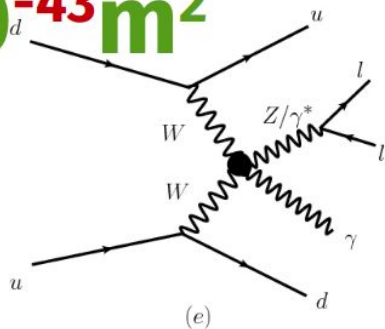
Secção eficaz inelástica:

$$70 \times 10^{-28} \text{ m}^2$$



pp → Zγqq:

$$15 \times 10^{-43} \text{ m}^2$$



- **Observar e prever o universo**

- 10^{-10} s após a sua formação

- à temperatura de 10^{15} K

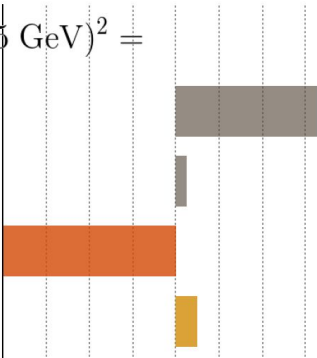
para mais detalhes sobre
Física de Partículas e o Universo, ver P. Abreu

Equilibrismo na natureza

• A massa do Higgs é “pequena”...

- $\frac{\text{Escala da gravidade}}{\text{Escala do Higgs}} \approx 10^{17}$
- m_{top} “equilibra” m_H em cerca de 10^{16}
- para as massas que medimos o potencial de Higgs pode não ser estável...

Motivo para programa de medidas de precisão e pesquisa de nova física

$$m_H^2 \approx (125 \text{ GeV})^2 =$$


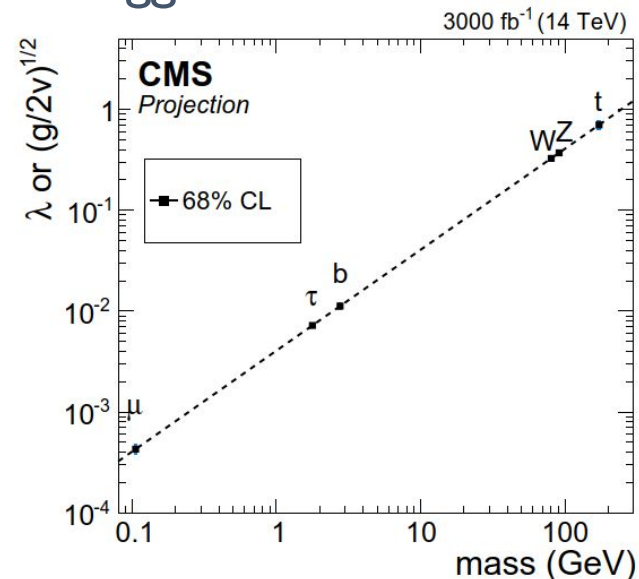
$$m_{H0}^2 + \frac{1}{16\pi^2} \lambda_H^2 \Lambda^2 - \frac{3}{8\pi^2} \lambda_t^2 \Lambda^2 + \frac{9}{64\pi^2} g^2 \Lambda^2$$



Que mistérios esconde o Higgs?

Medir mais precisamente os acoplamentos do Higgs

- com uma precisão entre os **2%-10%**
- diferentes espaços de fase?
- portal para produção de matéria escura?
- outros Higgs a contribuir na quebra de simetria electrofraca?
- ...



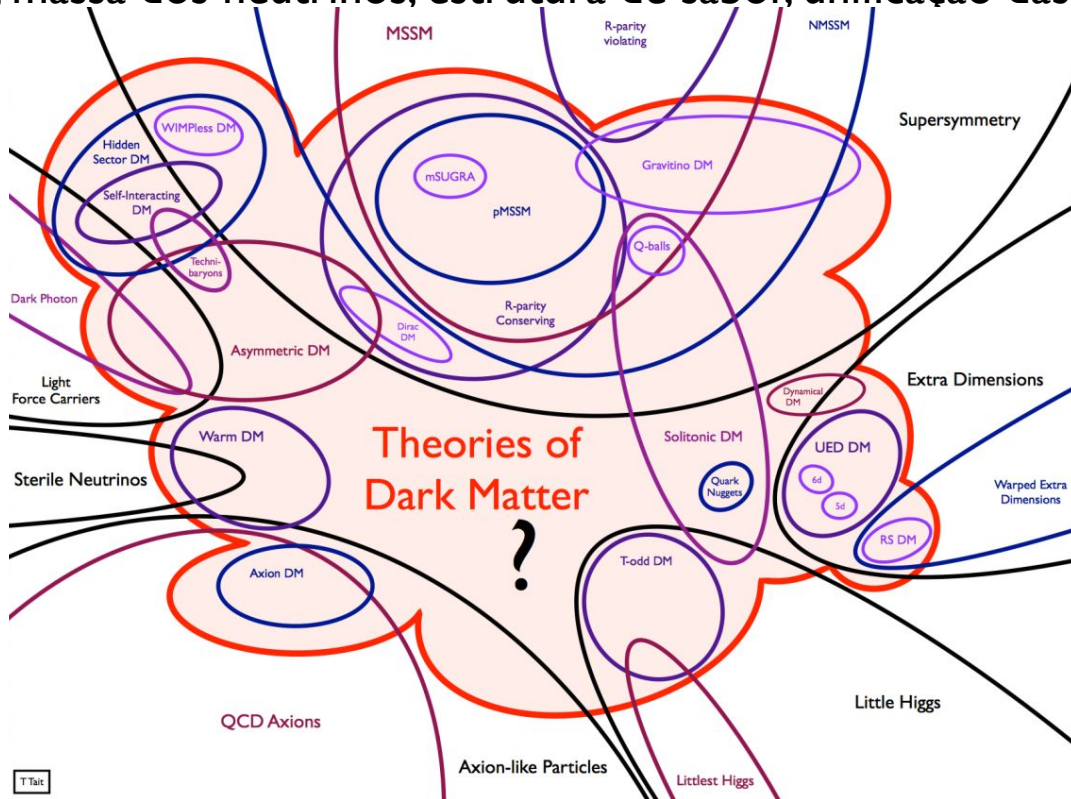
Processos raros, acoplamentos fracos

⇒ programa requer x20 mais luminosidade

O que está ainda por desvendar I

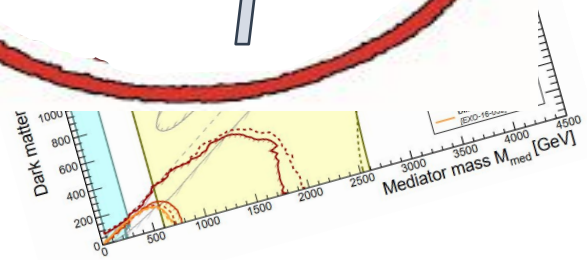
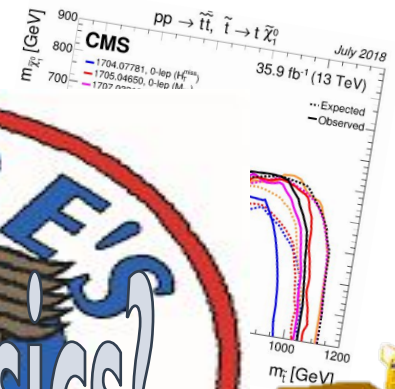
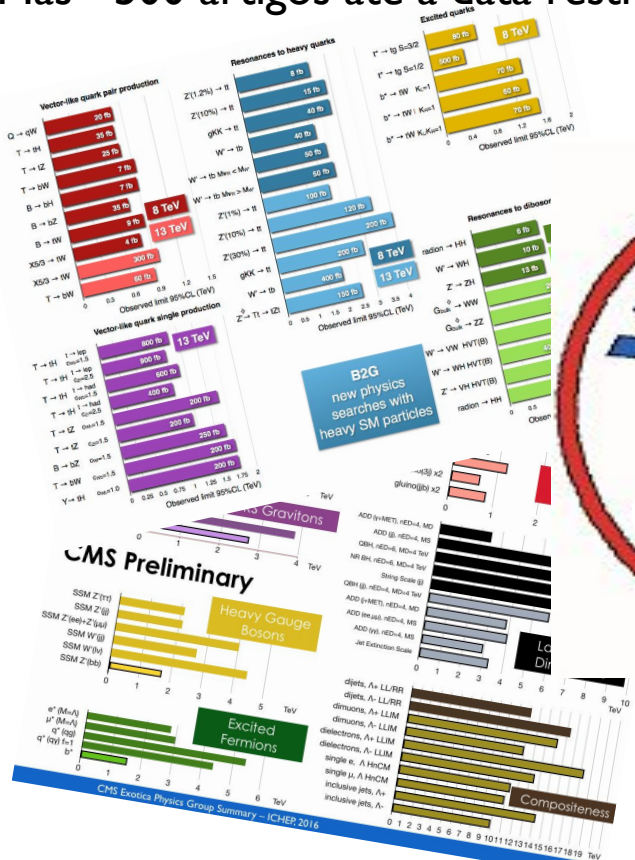
Os puzzles teóricos que motivaram o LHC continuam presentes:

matéria escura, massa dos neutrinos, estrutura de sabor, unificação das interações, ...



O que está ainda por desvendar II

Mas >500 artigos até a data restringem directamente o espaço de fase de nova física...



CMS Preliminary

CMS Exotic Physics Group Summary - ICHP 2016

O plano geral do LHC

Muitas descobertas em 7 anos de dados, o que nos reservam os 20 pela frente?



Para beneficiar do aumento de luminosidade do LHC os detectores devem ser actualizados

CMS: uma experiência em mutação

[Câmaras de muões]

Nova electrónica e detectores na região $1.5 < |\eta| < 2.4$
Identificação até $|\eta| = 3.0$

[Calorímetro central]

Nova electrónica; operado a frio (ECAL), renovação dos cintiladores (HCAL)



["Cronómetros"]

Novos detectores (LYSO+SiPM e LGAD) para medir o instante de passagem das partículas ($\delta t \sim 30\text{ps}$)

[Calorímetro tampa]

Substituído por Si e cintilador com alta granularidade e capacidade de medir o tempo



[Tracejador]

Completamente renovado, reconstrução até $|\eta| = 3.8$
Capaz de participar no trigger

[Trigger e aquisição de dados]

Inclui dados do tracejador no nível I.
Capacidade para produzir decisões a 750 kHz (nível I) 7.5 kHz (nível final)



Sumário

Com o Higgs o modelo padrão **está completo**
continua incompleto

Para já não há sinais directos de nova física nos dados de CMS

- será uma questão de estatística ou de escala de energia?
- **LHC: o único colisionador activo a explorar a fronteira de energia**

Oportunidade única: físicos, engenheiros, técnicos, estudantes

- testando os fundamentos da física com dados reais
- desenvolvendo tecnologia em parceria com a indústria
- colaboração à escala mundial **em que países de língua portuguesa têm impacto**





CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT
Run/Event: 194108 / 564224000

